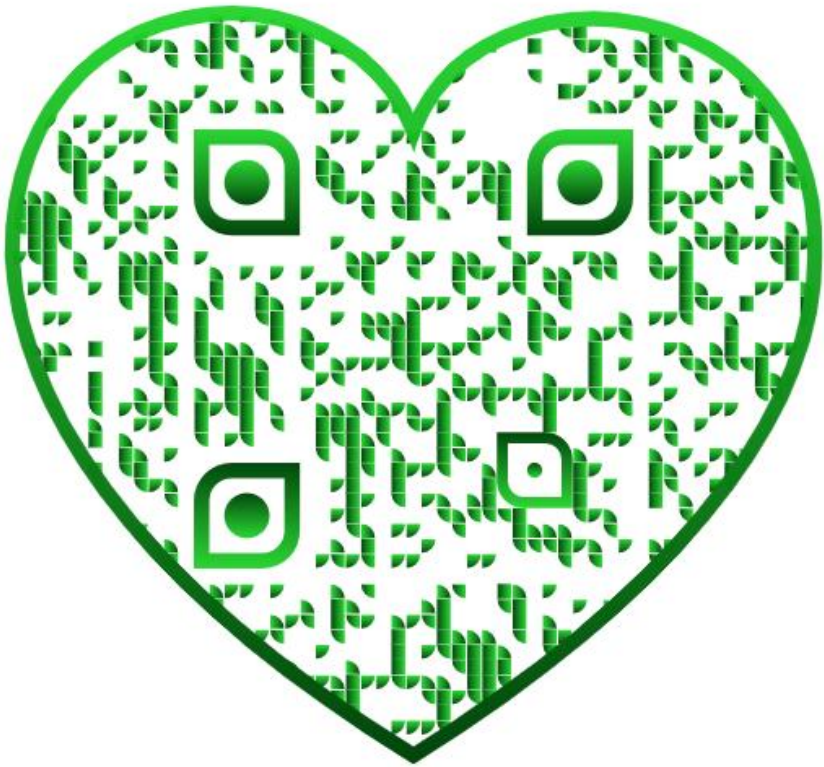
100 QUESTIONS POUR COMPRENDRE

les phénomènes de la nature

Compléments numériques

Patrick Bertrand



100 questions pour comprendre les phénomènes de la nature

Illustration de Chloé Chabert

Patrick Bertrand

100 questions pour comprendre les phénomènes de la nature

Chez le même éditeur

Vivre avec les virus. Devons-nous les craindre ?, Guillain Mikaty, préface du Pr Arnaud Fontanet, 2022.

Dérèglement climatique. Les vraies conséquences pour la santé et la biodiversité, Bernard Swynghedauw, préface de Gilles Boeuf, 2022.

Météorologie de l'espace. Vivre demain avec notre Soleil, Jean Lilensten, Frédéric Pitout, Marina Gruet &# J. Pedro Marques, préface d'Alain Cirou, 2021.

L'IA peut-elle penser ? Miracle ou mirage de l'intelligence artificielle, Hubert Krivine, préface de Guillaume Lecointre, 2021.

Transition énergétique. Ces vérités qui dérangent !, 2e édition, Bertrand Cassoret, préface de Brice Lalonde, 2020.

Pourquoi le nucléaire, Bertrand Barré, préface de Jean-Marc Jancovici, 2017.

Pour toute information sur notre fonds et les nouveautés dans votre domaine de spécialisation, consultez notre site web :

www.deboecksuperieur.com

Sommaire

- Couverture
- Sommaire
- Avant-propos
- 1. La Terre et ses mouvements autour du soleil
  - La Terre est ronde et on peut la mesurer
  - Se repérer dans le temps d'après le mouvement du soleil : calendriers et cadrans solaires
  - Les systèmes du monde. Preuves de la rotation de la Terre
  - Se repérer en mer avec les astres
- 2. L'eau sur Terre
  - L'eau, un liquide extraordinaire
  - La pression de l'eau
  - Les déformations de l'eau
  - Faire monter l'eau
  - Se ravitailler en eau
- 3. Les phénomènes atmosphériques
  - Les états de l'atmosphère
  - Les transformations de la vapeur d'eau dans l'air
  - Les précipitations
  - Les échanges de chaleur et l'effet de serre de l'atmosphère
- 4. Un monde de lumières et de couleurs
  - La lumière et ses changements de direction
  - La lumière nous en fait voir de toutes les couleurs
  - Les jeux du soleil et de l'atmosphère
- 5. La vie sur Terre
  - À la recherche des origines de la vie
  - L'univers fascinant des bactéries et des virus
  - La force tranquille des arbres
- Appendice
- Bibliographie
- Copyright
- Résumé

À Célia, Chloé, Claire, Estelle et Flora.

Avant-propos

Pour nos lointains ancêtres, les changements d'aspect du ciel, le vent, la pluie, les orages, les tempêtes et les crues étaient imprévisibles : les phénomènes naturels étaient soumis à des « esprits » avec lesquels il fallait dialoguer. Avec le développement de l'agriculture et de l'élevage, les hommes devinrent tributaires du cycle des saisons, et seuls des dieux puissants habitant les cieux pouvaient influer sur leurs destinées. Les montagnes, où se rencontrent le ciel et la terre, étaient des lieux privilégiés pour les approcher et solliciter leur bienveillance. Dans les Alpes-Maritimes, le mont Bego, qui culmine à près de 2 900 m, est réputé pour la violence et la fréquence de ses orages. Il y a quatre mille ans, c'était un site sacré où se rencontraient le dieu tauromorphe, dieu des saisons, des orages et de la pluie, et Gaïa, la déesse Terre, mère de la fertilité. Les dizaines de milliers de gravures qui couvrent les parois polies par les glaciers de la vallée des Merveilles sont autant de prières qui leur étaient adressées.

Peu à peu, les hommes ont pris conscience du caractère *compréhensible* du monde dans lequel ils vivaient : les mêmes causes produisent les mêmes effets et on peut décrire leurs relations grâce au langage des mathématiques. Ce langage constitue un obstacle pour beaucoup de personnes, mais on peut expliquer de nombreux phénomènes en s'appuyant sur des schémas et sur des exemples simples pris dans la vie de tous les jours. Ce livre comporte cinq parties :

- la Terre et son mouvement autour du Soleil ;
- l'eau sur Terre ;
- les phénomènes atmosphériques ;
- un monde de lumière et de couleurs ;
- la vie sur Terre.

Les grandeurs utilisées s'expriment avec des unités dont l'usage est rappelé dans un bref appendice. Le contenu du livre est basé en partie sur une série de cours et de conférences donnés à l'Université du

temps libre de Gap entre 2013 et 2018.

La contemplation d'un beau ciel étoilé, le scintillement des gouttes de rosée au petit matin, la magnificence des couchers de soleil et tous les spectacles que nous offre la vie, sont-ils moins émouvants quand on connaît les phénomènes qui les sous-tendent ? Hubert Reeves se pose la question dans *Malicorne*, mais la réponse ne fait aucun doute : son émerveillement devant les spectacles de la nature et la façon dont elle est structurée, apparaît dans toute son œuvre de vulgarisation scientifique et dans son engagement personnel. Dans *Le Cosmos et le Lotus*, Trinh Xuan Thuan va jusqu'à inverser les propositions : « C'est bien parce que je m'émerveille devant la beauté du monde et que je ressens son ineffable mystère que je fais de la science. » On ne saurait mieux dire…

Remerciements

De nombreuses personnes ont contribué à améliorer le contenu de ce livre et sa présentation. Je tiens à remercier Éric Barthélemy, Jean Bornarel et Philippe Vezinet pour leurs suggestions, ainsi que tous ceux qui ont bien voulu me communiquer leurs photos, et tout particulièrement Jérôme Astréoud pour ses beaux clichés d'astrophotographie. J'ai beaucoup apprécié le dialogue constructif avec Alain Luguet qui a permis de donner au livre sa forme définitive. Merci à Chloé pour son image « fille-étoile », et à Alain et Claudine pour m'avoir fait connaître l'œuvre poétique d'une jeune femme qui, bien plus tard, est devenue notre grand-mère.

1

La Terre et ses mouvements autour du soleil

La Terre est ronde et on peut la mesurer

On dit que la Terre est ronde. Mais c'est une plaisanterie. Il n'y a d'ailleurs qu'à la regarder. Elle est toute couverte de bosses, de cicatrices, de gros furoncles, toute mal cuite et toute mal fichue ; ravinée de crevasses, de rides, de creux, de sillons, percée de trous comme un gruyère.

Alexandre Vialatte, Chroniques

Comment les Grecs ont-ils évalué les dimensions de la Terre et de la Lune ?

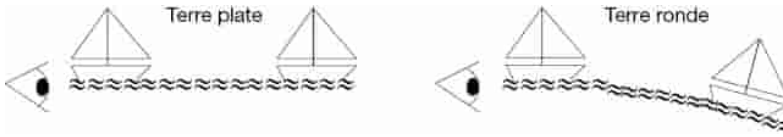
La rotondité de la Terre

Photo Éric Barthélemy

Le cap Morgiou dans le parc national des Calanques.

Certaines personnes prétendent voir la courbure de la Terre, mais il est vrai qu'on voit souvent ce qu'on a envie de voir. Pythagore, qui vivait en Grèce vers – 500 av. J.-C., fut un des premiers à affirmer que la Terre était ronde parce que la forme sphérique était parfaite. C'est généralement à Aristote, qui vécut cent cinquante ans plus tard, que l'on attribue les premiers arguments basés sur l'observation. Il faisait

remarquer que quand un bateau s'éloignait vers le large, c'était l'extrémité du mât qui disparaissait en dernier.

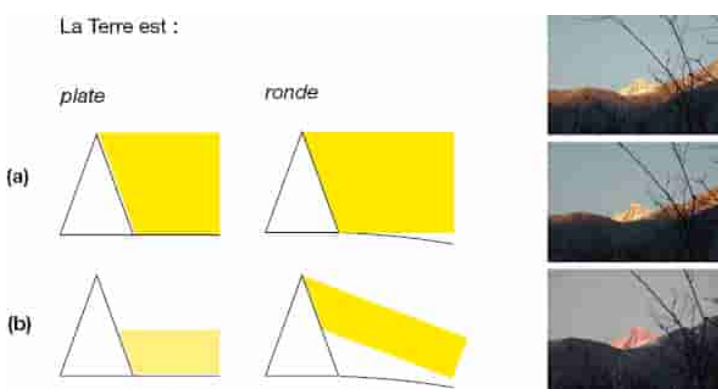


Disparition d'un bateau à l'horizon selon que la Terre est plate ou ronde.

On peut vérifier la pertinence de cet argument en calculant la distance à laquelle un objet disparaît à l'horizon à cause de la rotondité de la Terre. Elle dépend, bien sûr, de la hauteur de l'objet et de celle de l'observateur par rapport au niveau de la mer. Par exemple, un observateur de 1,70 mètre debout sur la plage voit disparaître un objet de 1 mètre à 8 kilomètres, et le mât d'un bateau de 10 mètres de haut à 16 kilomètres.

Distance en kilomètres à laquelle un observateur dont l'œil est situé à la hauteur indiquée dans la première ligne voit disparaître un objet dont la hauteur est donnée dans la colonne de gauche. La Terre est supposée sphérique d'un rayon de 6 370 km, et les effets de la réfraction atmosphérique sont ignorés. La méthode de calcul est décrite au premier complément page 21.

À cette distance, on voit un objet de 10 mètres sous un angle de 2 minutes, soit deux fois le pouvoir séparateur moyen de l'œil humain. On en déduit qu'Aristote avait une bonne vue… Il citait un autre phénomène, facile à observer sur les côtes montagneuses de la Méditerranée : au coucher du soleil, c'est la partie inférieure des montagnes qui reste éclairée le plus longtemps si la Terre est plate, alors que c'est leur partie supérieure si la Terre est ronde.



Variation de la partie éclairée d'une montagne au coucher du soleil.

Au début, toute la montagne est éclairée (a). À la fin (b), la partie éclairée n'est pas la même selon que la Terre est plate ou ronde. Les photos ont été prises en novembre à 17 h 10, 17 h 12 et 17 h 24, de haut en bas. Noter le rosissement final.

Aristote avançait un argument plus direct, mais qui ne se manifeste qu'à l'occasion des éclipses de Lune. Les Grecs avaient compris que la Lune est éclairée par le Soleil et que la succession de ses « phases » est due à la variation de la partie que nous voyons éclairée quand elle tourne autour de la Terre. Aristote savait que la Lune était « éclipsée » quand elle passait dans l'ombre de la Terre, et il voyait bien que l'ombre portée de la Terre dessinait alors un *arc de cercle* sur la Lune.

Photo Christian Dorel

Un spectacle assez fréquent, mais toujours émouvant : l'ombre portée de la Terre sur la Lune lors d'une éclipse totale de Lune.

Les enfants ont souvent du mal à accepter la rotondité de la Terre. Ils imaginent que les habitants des antipodes ont « la tête en bas » et cela les choque, même si on leur affirme que leurs pieds sont collés au sol par la pesanteur. Il suffit pour les convaincre de leur montrer une fourmi qui fait tranquillement le tour d'un ballon…

Focus

Pourquoi la Terre et les autres planètes sont-elles rondes ?

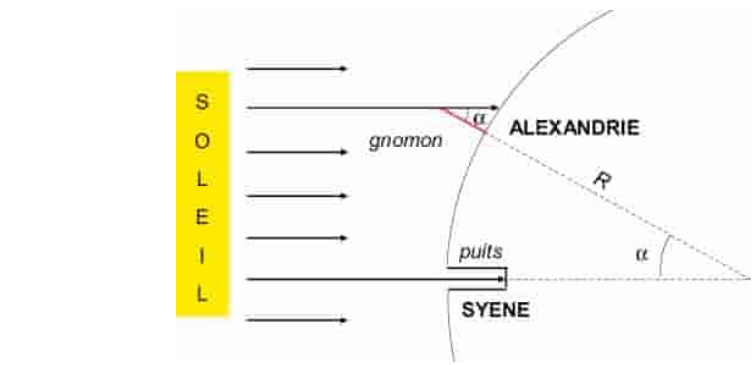
Les corps qui tournent autour du Soleil se sont formés par accrétion de grains de matière. Les forces de gravité avaient tendance à resserrer leurs éléments, arrondir les angles et les faire évoluer vers la sphère. Les corps les plus petits, où la gravité est faible, se sont refroidis trop tôt et ont conservé des formes plus ou moins cabossées. C'est le cas des astéroïdes, des comètes et de certains satellites des planètes géantes. Les planètes ne sont pas exactement sphériques, elles sont renflées à l'équateur à cause de leur *rotation* : le rayon équatorial de la Terre est un peu plus grand que le rayon polaire (tableau page 15).

Mesurer les rayons de la Terre et de la Lune, et leur distance

Quand les Grecs ont été convaincus que la Terre était sphérique, ils ont voulu mesurer son rayon. Vers 220 avant notre ère, Ératosthène trouva la bonne méthode. Astronome, philosophe et mathématicien,

Ératosthène était le directeur de la Grande Bibliothèque d'Alexandrie. Cette ville, située à l'ouest du delta du Nil, était devenue la capitale du monde grec après la mort d'Alexandre. Elle était célèbre pour son phare, qui a été classé par la suite parmi les sept merveilles du monde antique, mais aussi pour sa fameuse Grande Bibliothèque. C'était à l'époque la plus importante du monde, elle contenait environ 400 000 volumes. Mais ces volumes ne ressemblaient pas à nos livres ! C'étaient des rouleaux obtenus en assemblant des feuilles de papyrus, que l'on lisait en les déroulant.

Comme tous les astronomes de l'Antiquité, Ératosthène avait étudié le mouvement apparent du Soleil en suivant l'ombre d'un *gnomon*, un simple bâton planté verticalement grâce au fil à plomb. Il savait que chaque jour, la longueur de l'ombre passait par un minimum à midi et qu'elle indiquait alors la direction du nord. Il savait aussi que cette longueur minimale variait en cours d'année, et qu'elle était la plus courte le jour du solstice d'été où le soleil est le plus haut dans le ciel. Il avait appris que, ce jour-là, à midi, le soleil éclairait le fond d'un puits à Syène, une ville située beaucoup plus au sud dans la vallée du Nil. Le soleil y était donc au zénith. Mais au même moment, les rayons du soleil ne tombaient pas tout à fait verticalement à Alexandrie, puisqu'un gnomon faisait une petite ombre sur le sol.



Méthode employée par Ératosthène pour évaluer le rayon de la Terre.

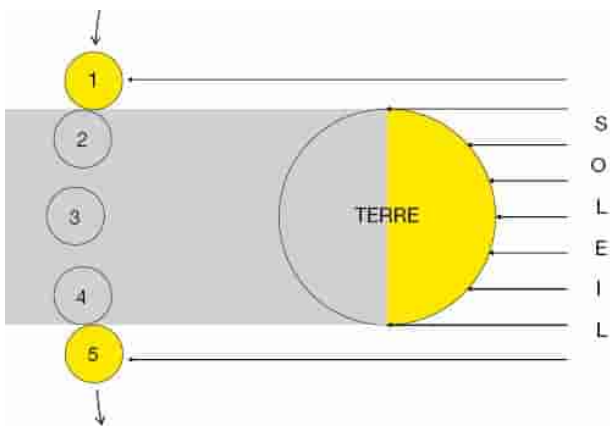
La figure représente le méridien d'Alexandrie qui passe non loin de Syène. Le jour du solstice d'été, à midi, les rayons du soleil tombent verticalement à Syène. Au même moment, ils font un petit angle avec la verticale à Alexandrie. Les longueurs et les angles ne sont pas à l'échelle.

Le rapport de la longueur de cette ombre et de la hauteur du gnomon était tel que l'angle α valait 7 degrés environ. Le cours du Nil étant approximativement orienté nord-sud, Syène et Alexandrie sont à peu près sur le même méridien. L'angle α est donc l'angle au centre d'un arc de méridien dont la longueur est la distance entre Syène et Alexandrie. En évaluant cette distance à 5 000 *stades*, environ 900 km, Ératosthène a estimé le rayon de la Terre à 7 400 km, une valeur

proche de la valeur réelle (tableau page suivante). Étant donné l'imprécision de ces mesures et l'incertitude sur la conversion des stades en kilomètres, ce bon accord est certainement fortuit. Mais cela n'empêche pas d'admirer la simplicité de la méthode ! Dans son roman *Les Cheveux de Bérénice*, Denis Guedj a raconté l'histoire de cette mesure en la replaçant dans son contexte historique.

Quelques longueurs caractéristiques de la Terre, de la Lune et du Soleil.

Les Grecs ont évalué par la même occasion le rayon de la Lune. En effet, Aristarque avait auparavant estimé le rapport des rayons de la Terre et de la Lune grâce à une méthode très ingénieuse. Lors d'une éclipse totale de Lune, celle-ci traverse entièrement l'ombre de la Terre.



Éclipse totale de Lune : la Lune passe dans l'ombre de la Terre.

La distance Terre-Lune étant égale à 60 rayons terrestres environ (la figure n'est pas du tout à l'échelle), la trajectoire de la Lune est quasi rectiligne.

Aristarque a comparé *la durée* nécessaire pour que la Lune traverse l'ombre de la Terre (passage de la position 2 à la position 5) à celle qui est nécessaire pour qu'elle disparaisse complètement (passage de la position 1 à la position 2). Le rapport de ces durées est égal à celui des rayons de la Terre et de la Lune. Aristarque a obtenu un rapport égal à trois : une bonne estimation (tableau page précédente), compte tenu des moyens dont il disposait. Les instruments de visée étaient rudimentaires et on mesurait les durées avec une clepsydre dans laquelle l'eau coulait régulièrement d'un récipient dans un autre. Les Grecs ont donc obtenu le rayon de la Lune. Ils évaluaient à un demi-degré l'angle sous lequel on voyait la Lune depuis la Terre, et ils en ont déduit que la distance Terre-Lune était égale à 76 rayons terrestres alors que la vraie valeur est 60,3.

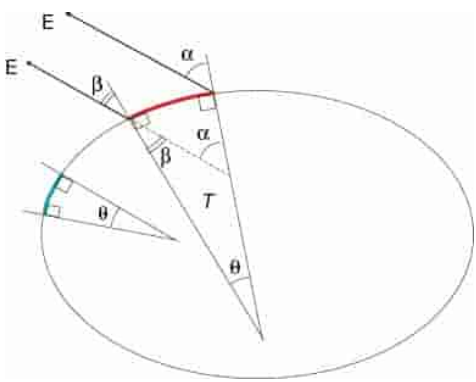
Mais aussi…

L'opinion d'Alexandre Vialatte sur le Soleil et la Lune

« La Lune a beaucoup plus d'importance que le Soleil qui n'éclaire les hommes que le jour. Elle les éclaire la nuit, ce qui est beaucoup plus utile. C'est grâce à elle qu'on peut retrouver au fond des bois les épingles, les trombones et les pièces de dix francs qu'on perd dans les forêts profondes. »

La Terre est-elle aplatie à l'équateur ou aux pôles ?

À la fin du XVII^e siècle et au début du XVIII^e siècle, la forme exacte du globe terrestre fut un objet de controverses. Les partisans de la théorie de Descartes prétendaient que la Terre était aplatie à l'équateur, alors que la théorie de Newton prédisait qu'elle était aplatie aux pôles sous l'effet de la force centrifuge. À cette époque, il n'y avait qu'une manière de trancher : comparer les longueurs d'arcs de méridien sous-tendus par un angle donné en des lieux de latitudes différentes. Cette longueur est en effet partout la même sur un cercle, mais elle varie avec la courbure sur une ellipse (figure page suivante).



Sur une ellipse, la longueur d'un arc sous-tendu par un angle θ donné dépend de sa position : l'arc rouge est plus grand que l'arc vert.

Pour déterminer l'angle θ sous-tendu par un arc, on mesure à ses extrémités les angles α et β qui donnent la direction d'une étoile E : en écrivant que la somme des angles est égale à 180° dans le triangle *T*, on obtient $\theta = \alpha - \beta$.

La mesure précise des distances

Pour mesurer une *distance* avec précision, on reportait sur le sol des perches calibrées de 2 ou 4 toises (une toise = 1,949 m) en les alignant soigneusement bout à bout. On imagine facilement les

difficultés que l'on pouvait rencontrer. Il était beaucoup plus facile de faire des mesures *angulaires* précises en visant des repères avec des lunettes dont l'oculaire était muni d'un réticule, et on savait relier les angles aux longueurs grâce aux tables de fonctions trigonométriques. Ces fonctions, dont l'intérêt avait été pressenti par certains astronomes grecs, avaient pris leur forme définitive au Ve siècle grâce aux mathématiciens indiens, et les mathématiciens arabes les avaient développées et tabulées. Elles facilitent les problèmes les plus simples (voir second complément page 21), et permettent la mise en œuvre des techniques de triangulation.

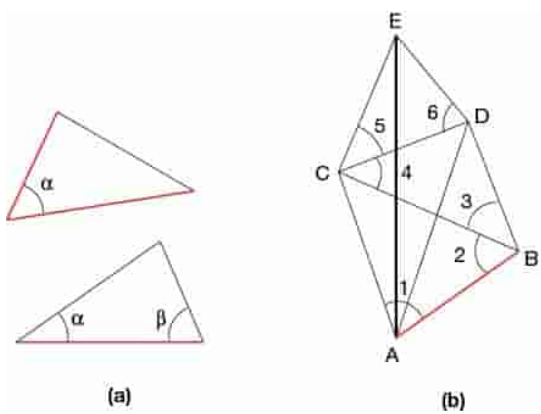
Qu'est-ce que la triangulation ?

Cette méthode repose sur deux propriétés (figure a page suivante).

• Dans un triangle, si on connaît la longueur d'un côté et les deux angles adjacents, on peut calculer les longueurs des deux autres côtés à l'aide de formules trigonométriques.

• Dans un triangle, si on connaît un angle et la longueur de ses côtés, des formules permettent de calculer les deux autres angles et la longueur du troisième côté.

La figure b montre un exemple de calcul de distance par triangulation. La distance à mesurer est AE.



Mesure des distances par triangulation.

On commence par sélectionner des *stations* C et D bien visibles de A et E et bien visibles entre elles, en s'efforçant de les faire alterner de part et d'autre de AE. On choisit aussi un site B bien visible des autres, tel que la distance AB puisse être mesurée avec une grande précision. AB constitue *la base* du système : sa longueur servira de référence dans tous les calculs ultérieurs. On mesure les angles 1 et 2, ce qui permet de calculer AC et BC, on mesure ensuite les angles 3 et 4 et on en

déduit BD et CD. De proche en proche, on détermine les côtés et les angles de l'ensemble du système de triangles. On termine par le triangle ADE qui permet de calculer AE. Il faut faire régulièrement des contrôles pour minimiser les erreurs : la somme des angles d'un triangle doit être égale à 180°, et la longueur d'un côté peut être calculée de plusieurs façons.

Ces techniques de triangulation avaient permis de dresser des cartes topographiques précises, et on espérait que l'aplatissement de la Terre était assez important pour être mis en évidence de cette façon.

Les expéditions du début du xviii^{e} siècle

L'Académie des sciences de Paris organisa plusieurs expéditions destinées à mesurer la longueur d'un arc de méridien sous-tendu par un angle de *un degré*, en France et en divers points du globe. Sur le terrain, on déterminait les verticales aux extrémités de l'arc avec un fil à plomb, on mesurait les angles α et β entre ces verticales et la direction d'une étoile E, et leur différence donnait l'angle θ (figure page 17). La longueur de l'arc de méridien était mesurée par triangulation. Les premières mesures faites en France par J. Cassini et La Hire, semblaient indiquer que l'arc de méridien était plus long au sud qu'au nord du pays. Mais des mesures effectuées ultérieurement en Laponie, au Pérou et au Cap montrèrent que l'arc de méridien était en réalité plus long près du pôle que de l'équateur : *la Terre est aplatie aux pôles*. On sait maintenant que les moyens techniques disponibles à cette époque ne permettaient pas de mettre en évidence l'écart par rapport à une sphère en se limitant au seul territoire français : dans le système GPS, la longueur d'un arc de un degré est égale à 111,240 km à Dunkerque et 111,085 km à Collioure. La précision des mesures effectuées il y a 300 ans est néanmoins remarquable si on considère les instruments dont on disposait et les conditions dans lesquelles elles ont été faites.

Différentes mesures de la longueur d'un arc de méridien de *un degré* au début du xviii^{e} siècle.

Quand et comment le mètre a-t-il été défini ?

Dans la France de l'Ancien Régime, la valeur des unités de mesure variait d'une seigneurie à l'autre, et même souvent d'une ville à une autre. Avec l'intensification des échanges commerciaux entre des régions de plus en plus éloignées, cette variabilité posait de gros problèmes. Le 8 mai 1790, l'Assemblée constituante demanda à l'Académie des sciences d'établir un système d'unités destinées à être

utilisées dans tout le pays. Ces unités devaient être faciles à utiliser et prises dans la nature, de façon à pouvoir être adoptées dans le monde entier. Une commission composée de Borda, Lagrange, Laplace, Monge et Condorcet décida de définir l'unité de longueur, le « mètre », comme la dix millionièmes partie du quart du méridien terrestre. Pour établir la correspondance entre le mètre et l'unité officielle du moment, la « toise de l'Académie », il fallait mesurer avec précision la longueur d'un arc de méridien. La commission confia aux astronomes Delambre et Méchain la lourde tâche de mesurer l'arc du méridien de Paris compris entre Barcelone et Dunkerque, long d'environ 1 000 km. Delambre se chargea de la section entre Rodez et Dunkerque, Méchain de celle entre Rodez et Barcelone. Deux bases d'une douzaine de kilomètres furent utilisées : l'une vers Melun, l'autre vers Perpignan. Il fallut une cinquantaine de jours pour les mesurer. Le système complet comportait 115 triangles.

Des sculptures du mètre ont été construites à Paris entre 1796 et 1797 pour familiariser la population avec sa longueur. Celle-ci est visible au 36 rue de Vaugirard.

Les deux astronomes disposaient d'instruments d'une grande précision. Mais l'époque était particulièrement troublée dans tout le pays. Leurs mesures éveillaient la suspicion des autochtones, et la France se trouva bientôt en guerre contre la plupart des pays d'Europe, en particulier l'Espagne. Denis Guedj a raconté dans son roman *La Méridienne* les difficultés que rencontrèrent les deux savants et les épisodes parfois rocambolesques qu'ils vécurent entre 1792 et 1799. Très motivés par l'importance de leur mission, ils réussirent à vaincre les obstacles.

Leurs travaux ont permis de définir le mètre avec une grande précision et de construire le célèbre prototype étalon.

Compléments

www.lienmini.fr/39798-cpltsP13

Calcul des distances
Comment mesurer la hauteur d'un arbre ?

Se repérer dans le temps d'après le mouvement du soleil : calendriers et cadrans solaires

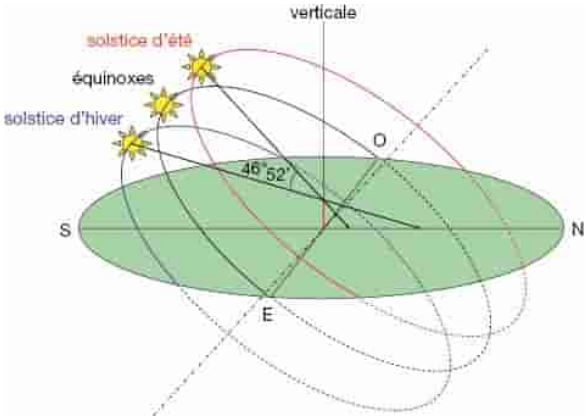
Le soleil continuait ses comptes sur le cadran blanc du ciel africain, suivant toujours les mêmes points de repère : les cabanes des pêcheurs à dix heures du matin, une falaise brune au-dessus du Chari à midi, le palmier solitaire de Fort-Fourau à quatre heures, et puis, vers cinq heures et demie, le major américain passant à cheval au grand galop sur l'autre rive, disparaissant du même côté que le soleil qu'il paraissait poursuivre avec frénésie.

Romain Gary, Les Racines du ciel

Comment établir un calendrier ?

Le mouvement apparent du Soleil

L'apparition du Soleil le matin et sa disparition le soir ont toujours rythmé les activités humaines. Les plus curieux ont appris très tôt à suivre sa marche dans le ciel en observant la rotation et la variation de longueur de l'ombre d'un *gnomon*, un bâton planté verticalement à l'aide d'un fil à plomb (figure page suivante). Ils ont constaté que la trajectoire apparente du Soleil variait tous les jours, mais que son point culminant se situait toujours dans un même plan vertical dit « méridien » qui la partageait en deux parties égales. Le mouvement apparent du Soleil est donc caractérisé par deux phénomènes cycliques : les passages successifs dans le plan méridien, séparés par *un jour*, et la lente variation de sa trajectoire de la plus basse au solstice d'hiver (21 ou 22 décembre) à la plus haute au solstice d'été (21 ou 22 juin), qui revient après *une année*.



Trajectoire apparente du Soleil perçue par un observateur situé à une latitude moyenne, les jours de solstice et d'équinoxe.

L'axe de rotation de la Terre figure en points tirets. Dans cette représentation, seule la *direction* du Soleil a un sens. Il est représenté au sommet de sa trajectoire, à midi. Il est alors dans le plan méridien du lieu dont la trace au sol est la direction nord-sud matérialisée par l'ombre d'un gnomon (rouge). La durée de la partie éclairée du jour, la *journée*, varie beaucoup pendant l'année. Les jours d'équinoxe, partout sur Terre, le Soleil se lève exactement à l'est et se couche exactement à l'ouest : la journée et la nuit ont la même durée.

Le jour s'impose naturellement comme unité de temps. Mais l'année rythme la succession des saisons, et tous les phénomènes qui l'accompagnent jouent un rôle essentiel dans la vie des hommes : le temps qu'il fait, l'avancement de la végétation et des cultures, l'apparition des crues, les étiages des rivières et des fleuves. Les astronomes de l'Antiquité eurent la responsabilité de combiner ces deux échelles de temps pour repérer les jours dans l'année à l'aide d'un *calendrier*, afin d'organiser la vie de la société dans le cadre des deux cycles temporels définis par le Soleil.

Le calendrier : un problème arithmétique insoluble

Le problème est le suivant : l'intervalle entre deux *équinoxes* de printemps, que l'on appelle l'*année tropique*, est égal à 365,2422 jours, soit 365 jours, 5 heures et 49 minutes, sans compter les secondes. Pour compliquer les choses, on a voulu grouper les jours en *mois* basés sur le cycle des phases de la Lune, qui dure 29 jours, 12 heures et 43 minutes. Même si leurs mesures n'étaient pas aussi précises, les astronomes de l'Antiquité savaient que ni l'année ni le mois ne comportent un *nombre entier* de jours, et ils ont proposé différentes solutions pour y remédier.

Le calendrier le plus simple a été établi en Égypte, environ 3 000 ans avant notre ère. L'année comportait 365 jours groupés en 12 mois de 30 jours, plus 5 jours supplémentaires. Il manquait donc environ un quart de jour par an. Les retards s'accumulaient

progressivement jusqu'à atteindre 25 jours en 100 ans, et une année en 1 461 ans. Pour comprendre ce que cela signifie, supposons que l'on utilise ce calendrier et qu'on fixe le solstice d'été au 21 juin la première année. La date du solstice dans le calendrier reculera chaque année et ne reviendra le 21 juin que dans 1 461 ans. Cette lente dérive ne gênait pas les Égyptiens, qui se contentaient d'ajouter un an tous les 1 461 ans et d'organiser une grande fête à cette occasion. Les Mésopotamiens privilégiaient le cycle lunaire. L'année comportait 12 mois de 29,5 jours obtenus en alternant des mois de 29 et de 30 jours. Elle ne durait que 354 jours, et il manquait un peu plus de 11 jours chaque année. Ils laissaient dériver le tout et se contentaient d'ajouter un treizième mois tous les trois ans. Ces manipulations du calendrier donnaient du pouvoir aux astronomes : étant les seuls à s'y retrouver, ils pouvaient se permettre de conseiller les rois.

Le problème n'a pas de solution exacte et on est obligé de recourir à des procédés plus ou moins artificiels. Notre calendrier actuel suit de très près la marche du Soleil, mais au prix d'une grande complexité. C'est le moment de rendre à César ce qui lui appartient. Bien conseillé, Jules décida en 46 avant J.-C. de fixer la durée de l'année à 365 jours et d'ajouter un jour tous les quatre ans pour rattraper le quart de jour manquant : ces années-là, dites « bissextiles », on doublait le sixième jour avant les calendes de mars. De nos jours, on ajoute un 29 février. Mais l'année moyenne du calendrier « julien » était *un peu trop longue*, de 11 minutes et 14 secondes. Cette petite avance du calendrier sur la marche du Soleil s'est cumulée peu à peu, jusqu'à atteindre 10 jours en 1582. Le pape Grégoire XIII prit le taureau par les cornes. Il décida de supprimer ces dix jours et de raccourcir très légèrement l'année moyenne en supprimant certaines années bissextiles : les années multiples de 100 mais pas de 400 ne sont pas bissextiles. Les années 1600 et 2000 l'ont donc été, mais pas 1700, 1800 ni 1900. Ce calendrier « grégorien » retarde un tout petit peu par rapport au Soleil, en moyenne de 26 secondes par an, soit un jour en 3 300 ans. L'écart est faible et on se contente de faire une petite correction de temps en temps.

Mais aussi…

Les mots du calendrier

Leur étymologie est d'origine latine.

Calendrier : *calendarium* (registre)

Équinoxe : *equinocte* (journée égale à la nuit)

Solstice : *solstitium* (arrêt du soleil)

Mois : *mensis*

Semaine : *septimana* (période de 7 jours)

Jour : *diurnus* (par l'intermédiaire de l'ancien français *jorn*)

Jours de la semaine

Lundi : *lunae dies* (jour de la Lune)

Mardi : *Martis dies* (jour de Mars)

Mercredi : *Mercurii dies* (jour de Mercure)

Jeudi : *Jovis dies* (jour de Jupiter)

Vendredi : *Veneris dies* (jour de Vénus)

Samedi : *sambati dies* (jour du sabbat)

Dimanche : *dies* dominici (jour du Seigneur)

Mois de l'année

Janvier : *januarius* (mois de Janus)

Février : *februarius* (mois de la purification)

Mars : *martius* (Mars)

Avril : *aprilis* (peut-être de Aphrodite)

Mai : *maius* (mois de la divinité Maia)

Juin : *junius* (mois de Junon)

Juillet : *julius* (mois de Jules César)

Août : *augustus* (mois d'Auguste)

Septembre : *septem* (7e mois de l'année romaine)

Octobre : *octo* (8e mois)

Novembre : *novem* (9e mois)

Décembre : *decem* (10e mois)

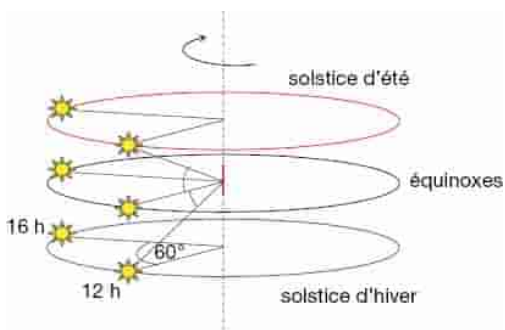
Quelle heure indique un cadran solaire ?

Pour suivre le déplacement du Soleil dans le ciel, les agriculteurs se sont longtemps contentés d'observer son passage au-dessus de repères faciles à identifier : sommets de montagnes, arbres isolés ou clocher d'une église. Les premiers cadrans solaires sont vraisemblablement apparus 1 500 ans avant notre ère, en Mésopotamie et en Chine. Les Mésopotamiens et les Égyptiens ont découpé *la journée* en douze *heures*

égales. Puisque la durée de la journée varie pendant l'année (figure page 23), celle de l'heure variait aussi. Cela nous paraît aberrant, mais cela ne gênait pas les Anciens. C'est seulement les jours d'équinoxe, où la journée dure 12 heures, que la durée de cette heure variable était la même que celle de notre heure actuelle.

Une question de style

Examinons de plus près le mouvement apparent du Soleil. Sur la figure de la page 23, sa trajectoire apparente journalière est représentée par un cercle, mais ce n'est qu'une approximation : entre le solstice d'hiver et le solstice d'été, le Soleil monte progressivement en tournant autour de l'axe de rotation de la Terre. Sa trajectoire apparente est donc une *spirale ascendante*, mais les spires sont très resserrées. L'écart angulaire entre les directions du Soleil à midi aux solstices d'été et d'hiver est égal à 46° 52', et le Soleil met six mois pour les parcourir. Il monte donc en moyenne de 0,26 degré par jour. C'est à peu près la moitié de l'angle sous lequel nous voyons le Soleil depuis la Terre. En ce qui concerne le fonctionnement des cadrans solaires, on peut donc bien raisonner comme si le Soleil tournait chaque jour sur un *cercle*. Ce cercle est reproduit sur la figure suivante les jours de solstice et d'équinoxe.



Rotation apparente du Soleil autour de l'axe de rotation de la Terre.

L'axe de rotation est en points tirets, et un style rouge est placé le long de l'axe. La direction du Soleil est représentée à 12 h et à 16 h, les jours de solstice et d'équinoxe. Les deux angles marqués sur la figure sont égaux à 23° 26'.

Les jours d'équinoxe, la direction du Soleil est perpendiculaire à l'axe de la Terre, et sa trajectoire apparente est dans le plan de l'équateur. Chaque jour, le Soleil tourne d'est en ouest à raison de 15 degrés par heure. À 16 h par exemple, quatre heures après son passage au méridien, il est dans un plan qui fait 60 degrés avec le plan méridien. Si on place un style le long de l'axe, à une heure donnée la *direction* de son ombre sur un plan quelconque sera la même tous les jours de l'année : pour que les graduations d'un cadran solaire soient

valables toute l'année, il faut que son style soit parallèle à l'axe de rotation de la Terre. Cette innovation essentielle a été introduite en Europe au XIVe siècle, sans doute par les Arabes. Mais elle a mis du temps à s'imposer partout.

Cadran de l'église de Saint-Marcel-de-Fontfouillouse (Gard).

Le style était horizontal. Le cadran comporte 24 graduations équidistantes dont la signification variait pendant l'année. Le cartouche, gravé en caractères gothiques, indique la date de construction : 1503.

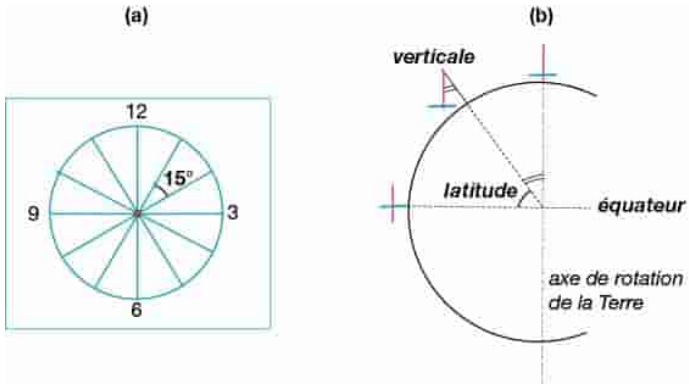
Mais aussi…

Le style

À l'origine, le mot latin *stilus* désignait le poinçon qui servait à écrire sur une tablette d'argile. C'est devenu par extension le style d'un cadran solaire, dont l'ombre « écrit » l'heure, mais aussi le stylo de l'écrivain et, au sens figuré, sa façon de s'exprimer.

Les lignes horaires

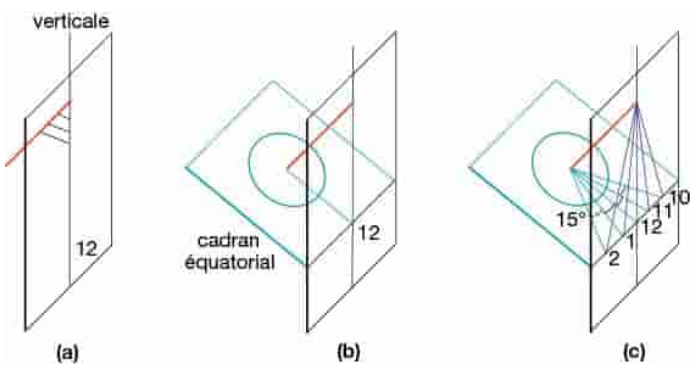
Le tracé des graduations, que l'on appelle les « lignes horaires », est particulièrement simple quand le cadran est perpendiculaire au style. En effet, il est alors parallèle à celui des trajectoires apparentes du Soleil (figure page 26). L'ombre du style tourne comme le Soleil de 15° par heure, et les lignes horaires sont les rayons d'un cercle centré au pied du style, équidistants de 15° (figure a page suivante). Ce type de cadran est qualifié d'*équatorial*, car son plan est parallèle à celui de l'équateur. Le cadran équatorial est représenté en divers points du globe sur la figure b page suivante.



Cadran équatorial.

(a) Le style (point rouge) est perpendiculaire au cadran. Les lignes horaires sont les rayons d'un cercle, équidistants de 15°.
(b) Le cadran est représenté au pôle Nord, en un lieu de latitude intermédiaire et à l'équateur. Le style rouge est parallèle à l'axe de rotation de la Terre, et le cadran (vert) est perpendiculaire au style. Les deux angles doublement barrés sont égaux.

L'angle entre le style et la verticale du lieu est le complémentaire de la latitude : il est égal à 90° à l'équateur et il est nul aux pôles. En France, où la latitude varie entre 42° et 51° environ, cet angle est voisin de 45°. Mais la plupart des cadrans solaires sont tracés sur des murs verticaux et ne sont donc pas équatoriaux. On trouve dans les traités spécialisés les formules trigonométriques qui permettent de les graduer. La figure suivante montre comment on peut procéder sans faire appel à ces formules.



Différentes étapes de la graduation d'un cadran vertical.

Pour la compréhension de la figure, le plan vertical est supposé transparent.

On marque l'emplacement du pied du style, et on trace la verticale qui passe par ce point. Le style est positionné dans le plan méridien qui passe par cette verticale, orienté de telle façon qu'à midi, heure solaire, son ombre soit sur la verticale et qu'il fasse avec la verticale un angle égal au complémentaire de la latitude (figure a). La verticale

donne la graduation 12 h. Tout plan perpendiculaire au style définit un cadran *équatorial* (figure b) que l'on peut graduer comme indiqué sur la figure précédente. Il suffit de prolonger ces rayons jusqu'au plan vertical pour obtenir les lignes horaires du cadran vertical (figure c). Si le mur est orienté plein sud (cadran *méridional*), l'intersection avec le plan du cadran équatorial est une horizontale est-ouest, et les graduations sont symétriques par rapport à la verticale.

Cadran solaire de l'église d'Abries (Hautes-Alpes).

Le chœur des églises étant généralement orienté vers l'est, un mur est souvent disponible pour un cadran « méridional ». C'est le cas de ce cadran daté de 1821, comme l'indique la symétrie des graduations par rapport à la verticale.

La symétrie disparaît quand le plan vertical est orienté différemment, on parle alors de cadrans *déclinants* (photos page suivante). Les lignes horaires d'un cadran vertical dépendent de la latitude du lieu, mais aussi de l'orientation du mur.

Exemples de cadrans « déclinants ».

À gauche : cadran ancien faiblement déclinant (Guillestre). Les lignes horaires sont presque symétriques par rapport à la verticale.
À droite : cadran fortement déclinant vers l'ouest (Abriès, Rémy Potey). Le style est presque parallèle au mur et les lignes horaires sont quasi parallèles.

Quelle est la différence entre heure légale et heure solaire ?

Si on compare l'heure donnée par un cadran solaire à celle de sa montre, on constate que le cadran retarde et on en conclut un peu vite que les cadrans solaires ne sont pas fiables. En réalité, ces deux instruments n'indiquent pas la même heure : le cadran solaire donne l'heure *locale*, celle du Soleil, alors que la montre donne l'heure *légale*. La différence est due principalement aux conventions qui régissent l'heure légale :

• Le découpage en fuseaux horaires. Par convention, l'heure légale est partout la même à l'intérieur d'un fuseau. La France est dans le fuseau horaire où l'heure légale est définie à partir de l'*heure locale de Greenwich*. Quand le Soleil passe dans le plan méridien de Greenwich, il est midi heure locale à Greenwich. Il est donc midi heure légale à Tarbes, Gap et Quimper. Tarbes est situé sur le méridien de Greenwich et l'heure locale est 12 h. Mais à Gap situé 6 degrés à l'est, le Soleil est déjà passé depuis 24 minutes dans le plan méridien, et l'heure locale est 12 h 24. Inversement, à Quimper situé 4 degrés à l'ouest de Greenwich, le Soleil ne passera dans le plan méridien que dans 16 minutes, et l'heure locale est 11 h 44. Le découpage en fuseaux horaires a pour conséquence certains paradoxes qui sont décrits au premier complément page 35.

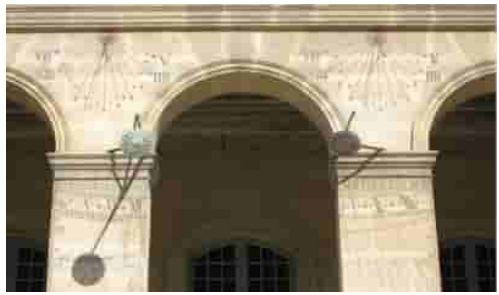
• Pour des raisons liées à nos pratiques quotidiennes, l'heure légale est l'heure locale à Greenwich plus une heure. Le décalage est porté à deux heures en été.

Même si on tient compte de ces corrections, l'heure indiquée par un cadran solaire ne peut pas coïncider exactement avec celle de nos montres, pour une raison fondamentale : la durée du jour solaire, qui sépare deux passages successifs du Soleil au méridien, varie un peu en cours d'année, de + 30 secondes à – 21 secondes par rapport à la moyenne. Cette variation était connue des astronomes de l'Antiquité, mais elle est devenue flagrante à la fin du XVII^e^ siècle quand la précision des horloges régulées par un pendule, comme celles réalisées par Christian Huygens, devint de l'ordre de quelques secondes par jour.

Horloge comtoise du milieu du xviii^e siècle.

Son mécanisme est encore très proche de celui des horloges réalisées par Huygens à partir de 1656.

Les variations de la durée du jour se cumulent, si bien que l'heure indiquée par un cadran solaire peut différer notablement de celle de nos montres qui est basée sur le *jour solaire moyen* (voir premier complément page 51). Des tables donnent l'écart entre le midi du soleil moyen et celui du soleil vrai pour chaque jour de l'année. C'est ce qu'on appelle « l'équation du temps ». Cet écart atteint environ + 14 minutes le 9 février et – 16 minutes le 4 novembre, et il s'annule quatre jours par an. On voit sous certains cadrans solaires une courbe dite *méridienne*, qui montre comment il varie en cours d'année.



Cadrans solaires comportant une courbe méridienne.

À gauche, cadran d'Apt (Vaucluse) datant de 1834. À droite, les cadrans de l'hôtel des Invalides réalisés en 1679. Une méridienne est tracée sur le pilier gauche.

Quand les cadrans solaires sont devenus moins précis que les horloges, leur intérêt a beaucoup diminué. Il faut reconnaître qu'ils avaient des inconvénients. Ils ne donnaient l'heure que les jours de soleil, seulement pendant une partie de la journée et durant une certaine période de l'année. Les cadrans auraient pu rendre service à ceux qui ne pouvaient pas se payer une horloge, mais ceux-ci n'avaient généralement pas besoin de connaître l'heure exacte. L'accélération des moyens de transport et de télécommunication a conduit à imposer la même heure dans tout le pays. Cette uniformisation du temps s'est heurtée à de nombreuses résistances, et elle n'a été réalisée qu'à la fin du XIXe siècle dans la plupart des pays d'Europe (en 1891 en France). Les cadrans sont restés des objets curieux et décoratifs, ornés de devises à caractère religieux ou évoquant la fuite du temps.

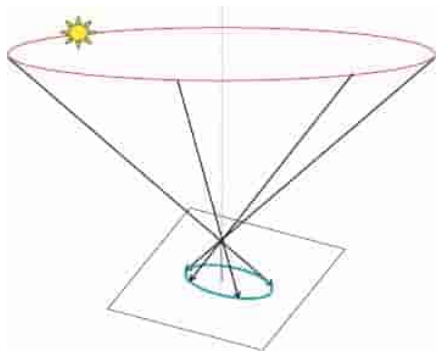
Les cadrans solaires en France

Une commission de la Société astronomique de France est chargée d'inventorier les cadrans de notre pays. Plus de 34 000 cadrans étaient recensés en France en 2015, et on en découvre de nouveaux chaque année. Il y en a un peu partout, mais leur densité varie beaucoup selon les régions. Le département le plus riche est la Charente-Maritime, avec 1 858 cadrans. Viennent ensuite les Hautes-Alpes (1 257), les Alpes-Maritimes (930), puis les départements du quart sud-est et du pourtour méditerranéen. Juste après le département des Alpes-de-Haute-Provence, qui arrive en neuvième position avec 604 cadrans, on trouve le Finistère (590). D'autres départements bretons sont très bien lotis. Par contre, la Corse du Sud arrive en avant-dernière position avec 25 cadrans, devant le Territoire de Belfort (14). L'ensoleillement est un facteur important, mais apparemment ce n'est pas le seul. Il y a peut-être des traditions locales, mais aussi la volonté

plus ou moins grande de préserver ces objets décoratifs mais très gênants quand on veut ravaler les façades ou isoler extérieurement les murs. La pluie et le soleil les dégradent, mais des artistes les restaurent en s'efforçant de respecter la décoration originelle masquée sous des ajouts ultérieurs. En Provence et dans les Hautes-Alpes, un des plus connus est Rémy Potey, qui peint aussi « à fresque » ses propres créations. Il en a plus de cent cinquante à son actif !

L'arc diurne

Quand le style est parallèle à l'axe de rotation de la Terre, la *direction* de son ombre à une heure donnée est la même tous les jours de l'année. Mais pendant la journée, sa *longueur* varie, et son extrémité « dessine » une courbe appelée l'*arc diurne*. Pour la rendre plus concrète, imaginons que l'extrémité du style soit percée comme le chas d'une aiguille. Le pinceau lumineux qui le traverse éclaire un point du cadran qui décrit l'arc diurne quand le Soleil se déplace dans le ciel.



L'arc diurne d'un cadran solaire.

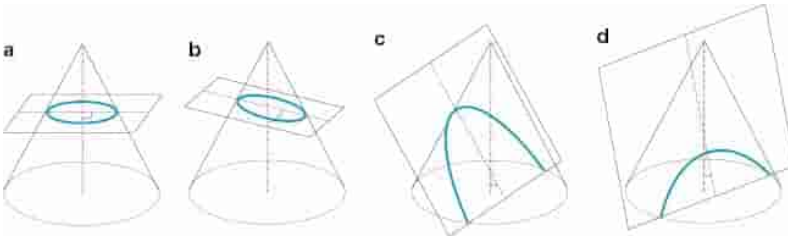
L'arc diurne varie tous les jours, et il est parfois représenté sur les cadrans pour les jours remarquables comme les solstices et les équinoxes.

La droite des équinoxes et plusieurs arcs diurnes sont tracés sur ce cadran méridional dû à Rémy Potey. Le style est équipé d'une petite boule noire dont l'ombre décrit l'arc diurne.

(a) Le jour de l'équinoxe d'automne, heure légale : 14 h.
(b) Le jour du solstice d'hiver, heure légale : 14 h 40.

La forme de l'arc diurne est particulièrement simple dans le cas d'un cadran équatorial. En effet, le plan du cadran est alors parallèle à la trajectoire apparente du Soleil, et l'intersection du cône de révolution de la figure précédente avec ce plan est *un cercle*. D'après la figure de la page 26, le passage du solstice d'été à l'équinoxe d'automne entraîne un aplatissement du cône et donc un élargissement du cercle. Le jour d'équinoxe, le cône est complètement aplati et le cercle devient infiniment grand. Entre l'équinoxe et le solstice d'hiver, le Soleil éclaire la face inférieure du cadran. Si on place un style dessous, le cercle, infiniment grand aux équinoxes, rétrécit quand on se rapproche du solstice d'hiver. En réalité, le Soleil n'éclaire le cadran que pendant la *journée*, et les arcs diurnes sont des *arcs de cercle* centrés au pied du style, que l'on peut tracer sur les deux faces.

Quand le cadran n'est pas équatorial, la forme de l'arc diurne dépend de l'inclinaison du cadran par rapport à l'axe, et les différentes situations possibles sont représentées sur la figure page suivante. On peut les retrouver en s'aidant de situations concrètes où un cône est coupé par un plan (second complément page suivante). Sur la figure a ci-après, le cadran est perpendiculaire à l'axe et l'intersection est un *cercle* : on retrouve le cadran équatorial. Si on incline un peu le cadran, on obtient une *ellipse* (figure b). Si on l'incline davantage, on passe par une situation où le cadran est parallèle à une génératrice du cône : la courbe d'intersection s'ouvre et devient une *parabole* (figure c). Si on incline encore le cadran, on obtient une *hyperbole* (figure d) : c'est le cas des cadrans verticaux aux latitudes moyennes, donc dans toute l'Europe.



Variation de la forme de l'arc diurne (en vert) en fonction de l'angle entre le style et le plan du cadran.

(a) Le plan est perpendiculaire à l'axe du cône : la courbe est un *cercle*.
(b) On incline un peu le plan : la courbe devient une *ellipse*.
(c) Le plan est parallèle à une génératrice : la courbe est une *parabole*.
(d) On incline encore le plan : la courbe devient une *hyperbole*.

Comment varient ces courbes pendant l'année ? Quand les cônes s'aplatissent, les courbes s'élargissent. Les jours d'équinoxe, le cône devient un plan perpendiculaire au style qui passe par son extrémité. Son intersection avec le plan du cadran est *une droite* dite « des équinoxes ». Sur un cadran vertical orienté plein sud, cette droite est horizontale et orientée est-ouest (voir photos page précédente).

Compléments

www.lienmini.fr/39798-cpltsP27

Les fuseaux horaires, sources de paradoxes
Exemples concrets d'intersection d'un cône et d'un plan

Les systèmes du monde. Preuves de la rotation de la Terre

Voila le mouvement diurne apparent des étoiles, et le mouvement diurne des autres corps célestes, et d'autre part l'aplatissement de la Terre, la rotation du pendule de Foucault, la giration des cyclones, que sais-je encore ? Pour le ptoléméien, tous ces phénomènes n'ont entre eux aucun lien ; pour le copernicien, ils sont engendrés par une même cause. En disant que la Terre tourne, j'affirme que tous ces phénomènes ont un rapport intime.

Henri Poincaré, La Valeur de la science

Géo- ou héliocentrique ?

La rotation du Soleil dans le ciel est un mouvement *apparent*, mais les astronomes ont mis beaucoup de temps pour s'en apercevoir et l'accepter. Les principales étapes de cette longue histoire sont évoquées dans ce chapitre. Elles montrent à quel point les idées préconçues peuvent obscurcir et retarder la compréhension du monde.

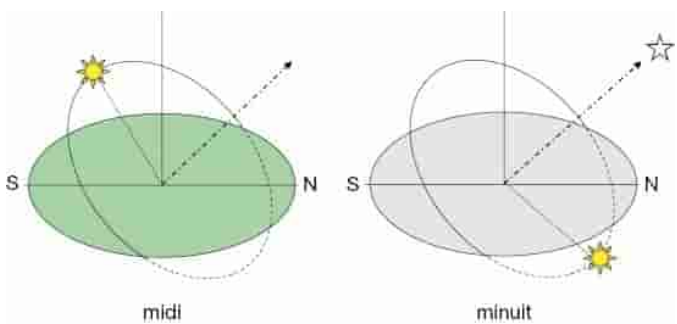
Le mouvement apparent des astres sur la voûte céleste

La nuit, une voûte parsemée d'étoiles tourne inlassablement autour de nous (figure page suivante). Pour suivre le mouvement des étoiles, on les a groupées en *constellations* faciles à identifier, auxquelles on a donné des noms assez fantaisistes. Nous savons maintenant que ces groupements sont complètement arbitraires, les étoiles d'une constellation pouvant être à des distances très différentes.

Photo Sylvain Roux/Association Copernic

La ronde des étoiles autour de l'axe de la Terre.

Certains observateurs se sont aperçus que des *astres* se déplaçaient par rapport aux étoiles : la Lune, les cinq planètes visibles à l'œil nu (Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne), ainsi que le Soleil. Le déplacement du Soleil est difficile à mettre en évidence, car on ne voit pas les étoiles pendant la journée. Mais si on regarde vers le sud *à minuit* plusieurs jours de suite, on constate que les constellations passent chaque nuit un peu plus tôt dans le plan méridien. Or, minuit, c'est l'instant où le Soleil passe dans le plan méridien *sous l'horizon nord*.

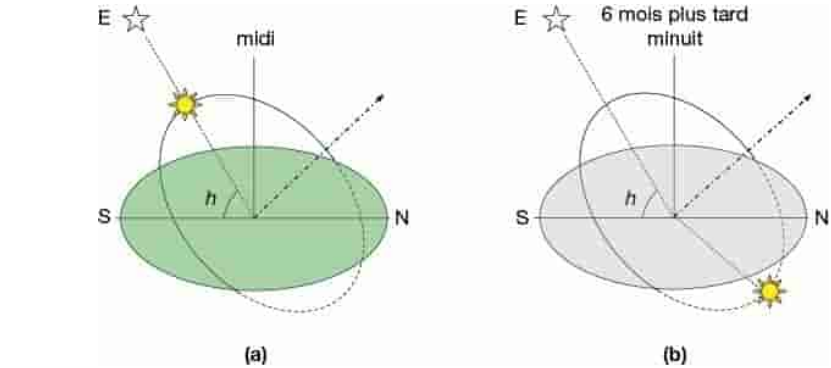


Passages du Soleil dans le plan méridien à midi et à minuit *le même jour*.

L'axe de rotation de la Terre est en points tirets, la verticale du lieu en trait continu.

Le Soleil est donc *en retard* par rapport aux étoiles, de 4 minutes par jour environ. Puisqu'il tourne de 360° en 24 heures, ce retard correspond à une rotation de un degré. Les retards se cumulent, si bien que le décalage atteint 30 degrés au bout d'un mois et 360° au bout d'un an. Les astronomes de l'Antiquité en déduisaient que le Soleil se déplaçait sur la voûte étoilée en sens inverse de la rotation diurne, et qu'il faisait un tour complet en un an. Ils avaient déterminé la *trajectoire* du Soleil sur la voûte céleste en employant une méthode

très ingénieuse. Supposons que l'on veuille identifier l'étoile E devant laquelle le Soleil passe à midi un jour donné. Ce jour-là, on mesure à midi la *hauteur h* du Soleil, c'est-à-dire l'angle entre sa direction et la direction nord-sud (figure a ci-dessous). Le Soleil et l'étoile E tournent autour de l'axe de la Terre, mais le Soleil se décale chaque jour de un degré par rapport à E. Six mois plus tard, le décalage atteint 180° : à minuit, le Soleil passe dans le plan méridien sous l'horizon nord, et l'étoile E passe dans le plan méridien *au sud*. Il suffit de mesurer sa hauteur *h* pour l'identifier (figure b).



Détermination de la trajectoire apparente du Soleil sur la voûte céleste.

(a) Le Soleil passe à midi devant une étoile E que l'on veut identifier.
On mesure sa hauteur *h* avec un gnomon.
(b) Six mois plus tard, à minuit, le décalage entre le Soleil et E est égal à 180°.
E est l'étoile de hauteur *h* qui passe au même instant dans le plan méridien.

Vers environ 1 000 ans avant J.-C., les astronomes mésopotamiens et leurs successeurs ont déterminé la trajectoire des astres sur la voûte céleste, et ils les ont inscrites sur leurs tablettes. Ils ont constaté que les trajectoires des planètes étaient proches de celle du Soleil. Ils ont aussi observé que des phénomènes très spectaculaires, comme l'apparition de comètes et les éclipses de Soleil ou de Lune, se produisaient de façon périodique, ce qui leur a permis de les prédire. Certains ont voulu aller plus loin en prédisant l'avenir des hommes à partir de la position du Soleil sur sa trajectoire. Cette trajectoire, « l'écliptique », traverse treize constellations à peu près régulièrement réparties sur l'année. Les astrologues en ont éliminé une de façon à faire correspondre une constellation à chaque mois de l'année. L'ensemble des douze constellations constitue le « zodiaque ». Début juillet par exemple, à midi, la direction du Soleil est proche de celle de la constellation du Cancer et les astrologues disent : « Nous sommes dans le signe du Cancer. »

Le système géocentrique

À partir du Ve siècle avant J.-C., les astronomes grecs ont voulu comprendre ce qu'ils observaient. Pour ces passionnés de géométrie fascinés par la forme « idéale » du cercle, cela voulait dire reproduire les déplacements apparents des astres sur la voûte céleste à l'aide de combinaisons de mouvements circulaires à vitesse constante. Après avoir vainement essayé des trajectoires circulaires centrées sur la Terre, il fallut compliquer les choses en introduisant des cercles « excentriques » et des « épicycles ». La meilleure description des déplacements apparents des astres basée sur une Terre immobile et des combinaisons de mouvements circulaires a été faite au deuxième siècle après J.-C. par Claude Ptolémée. C'est le modèle *géocentrique*, qui reproduisait bien les observations, mais au prix d'une grande complexité. Il avait le mérite de reproduire le phénomène de « précession des équinoxes ». En comparant ses observations à celles de ses prédécesseurs, Hipparque avait découvert au deuxième siècle avant J.-C. que l'intersection du plan de l'équateur avec le plan de l'écliptique se déplaçait très lentement sur la voûte étoilée. Nous savons aujourd'hui que ce déplacement est dû à la *précession* de l'axe de rotation de la Terre par rapport à une perpendiculaire au plan de sa trajectoire, comme celle de l'axe d'une toupie par rapport à la verticale.

Toupie animée d'un mouvement de précession.

Ce mouvement est très lent, puisqu'il faut 26 000 ans pour que l'axe fasse un tour complet, mais il explique pourquoi cet axe ne pointait pas vers l'étoile polaire il y a 2 500 ans. Le Soleil ne traversait pas les constellations du zodiaque au même moment de l'année que maintenant, ce qui remet en cause les fondements de l'astrologie.

Focus

Le mouvement de précession

Quand une toupie dont l'axe est incliné tourne rapidement, son poids ne tend pas à l'incliner davantage, mais à faire *tourner cet axe autour de la verticale*. C'est « l'effet gyroscopique » qui permet

aux cyclistes de lâcher le guidon de leur vélo. La Terre étant aplatie aux pôles et son axe de rotation étant incliné sur l'écliptique, les forces d'attraction du Soleil font tourner lentement cet axe autour d'une perpendiculaire au plan de l'écliptique.

Les astronomes grecs avaient conscience de la grande complexité du modèle géocentrique, et certains avaient tenté d'expliquer les mouvements apparents des astres dans le cadre d'un modèle *héliocentrique* où la Terre tournait sur elle-même et autour du Soleil. Le plus connu d'entre eux est Aristarque, qui avait évalué le rayon de la Lune et la distance entre la Terre et la Lune (figure page 15). On lui a objecté que si la Terre se déplaçait pendant l'année, on devrait voir les constellations se déformer à cause de la « parallaxe ». Cette objection mérite d'être examinée de près. Observons, par exemple, les *cercles* de la première figure page 28. Si on se déplace sur le côté et on les regarde, on voit des *ellipses*. Cette déformation est un effet de la *parallaxe*. Si le lecteur recule de quelques mètres et refait le même déplacement, la déformation sera beaucoup plus faible : la parallaxe ne modifie l'aspect d'un objet que s'il est *assez proche*. Les Anciens pensaient que les étoiles étaient relativement proches, et qu'on aurait dû voir les constellations se déformer si la Terre s'était déplacée. Comme ce n'était pas le cas, ils refusaient cette hypothèse et on peut difficilement le leur reprocher. Le modèle géocentrique de Ptolémée est donc resté la référence absolue pendant près de 1 400 ans. Nous savons maintenant que l'orbite terrestre est très petite par rapport aux distances phénoménales des étoiles, ce qui explique que les Anciens n'aient pas observé l'effet de la parallaxe.

Le système héliocentrique

Nous arrivons au XVI^e^ siècle. Un astronome polonais, Nicolas Copernic, estimait que le modèle de Ptolémée était bien trop compliqué. Il montra qu'il était équivalent, et beaucoup plus simple, de supposer que la Terre tournait sur elle-même en 24 heures et que les planètes, y compris la Terre, évoluaient à vitesse constante sur des trajectoires circulaires centrées sur le Soleil. Ce modèle reproduisait assez bien le mouvement apparent des planètes si on les rangeait dans l'ordre que nous connaissons : Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne. L'accord était encore meilleur si on faisait varier un peu la vitesse des planètes le long de leur trajectoire. Copernic était chanoine, il était conscient des difficultés auxquelles il s'exposait en publiant ses travaux. Son ouvrage *De revolutionibus orbium coelestum* ne parut que l'année de sa mort, en 1543. L'étape suivante fut franchie au

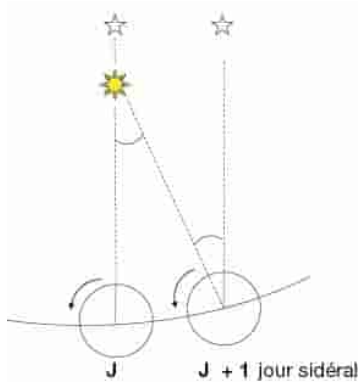
début du XVIIe siècle par un astronome allemand, Johannes Kepler, qui bénéficiait des données très précises que venait de compiler le Danois Tycho Brahe. Kepler a montré que le modèle héliocentrique rendait parfaitement compte de ces données à condition de supposer que les trajectoires des planètes n'étaient pas des cercles mais des *ellipses*. Et il a montré que les dimensions et les durées des trajectoires de toutes les planètes étaient liées par des relations mathématiques, les fameuses « lois de Kepler ». Les physiciens d'aujourd'hui admirent la synthèse réalisée par Kepler. Le fait de remplacer les cercles par des ellipses rend inutiles les artifices que Ptolémée et Copernic avaient dû introduire dans leurs modèles. Les Grecs connaissaient l'ellipse, mais ils étaient obnubilés par la « perfection formelle » du cercle.

Galilée, contemporain de Kepler, a défini et mis en œuvre la démarche scientifique faite d'allers-retours entre observations, hypothèses et expérimentation. En astronomie, il a été le premier à braquer une lunette vers le ciel et il s'est émerveillé de ce qu'il y découvrait : les cratères de la Lune, des milliers d'étoiles, et surtout les satellites de Jupiter qui l'ont convaincu que dans l'Univers, ce sont les petits objets qui tournent autour des gros. Dès lors, il est devenu un défenseur acharné du modèle héliocentrique, ce qui lui a attiré les ennuis que l'on sait. Précisons que l'on voit quatre des douze satellites de Jupiter (Io, Europe, Ganymède et Callisto) avec une simple paire de jumelles, et qu'on peut suivre leurs déplacements relatifs en les observant pendant plusieurs nuits de suite. Kepler avait décrit les mouvements des planètes autour du Soleil en 1619. Cinquante ans plus tard, Isaac Newton a démontré que ces mouvements étaient dus à une force d'attraction, la gravité, qui est la même que celle qui fait chuter les corps.

Quelle est la différence entre le jour solaire et le jour sidéral ?

Le *jour solaire* est la durée qui sépare deux passages successifs du *Soleil* au méridien d'un lieu. Il varie un peu en cours d'année, et sa moyenne est par définition égale à 24 heures.

Le *jour sidéral* est la durée qui sépare deux passages successifs d'une *étoile* au méridien. Il est égal à 23 h 56 min 4 s. C'est la durée de la rotation de la Terre.



Jour solaire et jour sidéral.

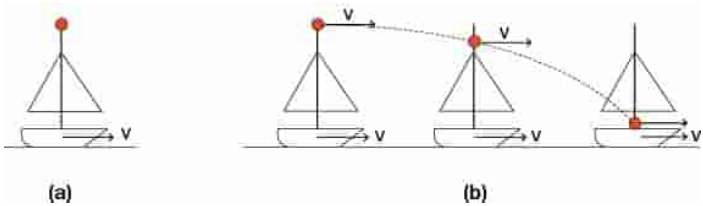
La différence de 4 minutes environ, déjà évoquée plus haut (figure page 37), est due à la rotation de la Terre autour du Soleil, comme le montre la figure ci-dessus. En effet, le jour J, le Soleil passe au méridien d'un lieu (en rouge) en même temps qu'une certaine étoile. Un jour sidéral plus tard, l'étoile passe au même méridien, mais la Terre doit encore tourner de l'angle indiqué sur la figure pour que le Soleil passe au méridien. Cet angle vaut en moyenne 360/365 = 0,986 degré par jour, ce qui correspond au décalage temporel de 4 minutes environ. Mais la Terre ne se déplace pas à vitesse constante et le décalage angulaire quotidien varie entre 0,953° en juillet et 1,019° en janvier. C'est une des contributions à « l'équation du temps ».

Quelles sont les preuves du mouvement de la Terre ?

À la fin du XVII^e^ siècle, la plupart des scientifiques avaient adopté le modèle héliocentrique parce qu'il décrivait les mouvements des astres vus depuis la Terre de façon beaucoup plus simple que le système de Ptolémée. Mais il n'y avait aucune preuve *expérimentale* de la rotation de la Terre, ni de son déplacement autour du Soleil. Quand un voyageur assis dans un train en gare regarde par la fenêtre, il n'a aucun moyen de savoir si c'est son train qui démarre lentement ou si c'est celui qui est garé à côté. On pourrait penser que c'est la même chose pour le mouvement de la Terre, mais ce n'est pas le cas : il s'agit d'un *mouvement de rotation* que l'on peut mettre en évidence expérimentalement. Les expériences n'ont été réalisées qu'au XIX^e^ siècle.

La déviation vers l'est de la chute des corps

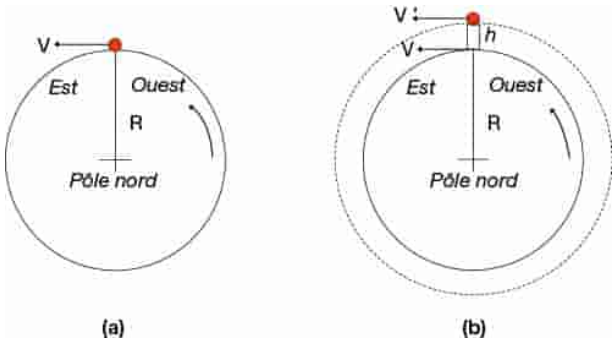
Rappelons le problème classique de la boule lâchée du haut du mât d'un bateau qui avance à la vitesse constante V (figure a ci-dessous). Il s'agit de savoir où la boule va tomber, et le schéma de la figure b donne la solution.



Le problème de la boule et du bateau.

Quand la boule est en haut du mât, elle avance horizontalement avec la même vitesse que le bateau. Quand on lâche la boule, son poids la fait tomber verticalement, mais elle continue à avancer horizontalement à la même vitesse et elle descend le long du mât. On néglige, bien sûr, la résistance de l'air qui peut freiner différemment la boule et le bateau. Vue du rivage, la trajectoire de la boule est la même que si on la lançait horizontalement avec la vitesse V. Un calcul très simple montre qu'elle décrit un arc de *parabole* (deuxième complément page 51). Examinons maintenant l'effet de la rotation de la Terre. La figure suivante montre la Terre vue par un observateur situé à la verticale du pôle Nord. Sur la figure a, une boule est posée sur le sol à l'équateur. La rotation de la Terre d'ouest en est lui imprime une vitesse facile à calculer. La longueur de l'équateur est égale à environ 40 000 kilomètres et la boule les parcourt en 24 heures. Sa vitesse est donc égale à 1 670 km/h, soit 463 m/s. On ne ressent pas cette vitesse fantastique parce que le sol et tout ce qui nous entoure se déplacent à la même vitesse.

On place ensuite la boule au sommet d'une tour très haute, toujours à l'équateur, et on la lâche (figure b).

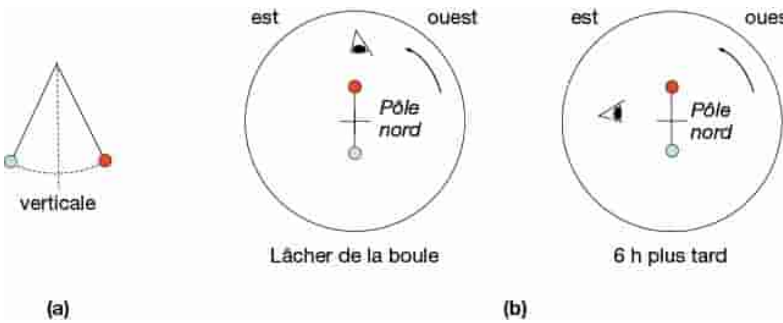


La déviation vers l'est de la chute des corps.

Il semble que le problème soit identique à celui du bateau (figure page précédente). Mais à cause de la rotation de la Terre, la trajectoire de la boule en haut de la tour est un peu plus longue que lorsqu'elle est au sol. Sa vitesse V' est donc un peu plus grande et, quand on la lâche, elle tombe un peu *à l'est* du pied de la tour. Cet effet existe aussi en haut du mât du bateau, mais il était supposé implicitement que celui-ci se déplaçait horizontalement. Le calcul montre que la déviation est proportionnelle à la vitesse de rotation de la Terre, et qu'elle est d'autant plus grande que la tour est haute. L'effet est maximum à l'équateur, et il est nul aux pôles, où les vitesses V et V' sont nulles. L'expérience a été réalisée en 1831 à Freiberg, en Allemagne, où la circonférence parcourue et, par conséquent, la vitesse sont plus petites qu'à l'équateur. Pour éviter les perturbations dues au vent, elle a été faite dans un puits de mine profond de 158 m. Toutes les précautions avaient été prises, et la déviation a été mesurée avec une très grande précision. L'expérience a été répétée 106 fois et a donné des résultats compris entre 2,79 et 2,87 cm alors que la déviation calculée était de 2,75 cm (second complément page 51). Cette expérience a été la première à mettre en évidence la rotation de la Terre.

Voir tourner la Terre : le pendule de Foucault

Seuls des spécialistes avaient pu apprécier la précision remarquable de l'expérience que nous venons de décrire. Celle du pendule de Foucault est simple, spectaculaire, et tout le monde peut l'observer. Un pendule est une boule qui oscille, suspendue à un support par un fil. La durée des oscillations dépend très peu de leur amplitude, ce qui a valu au pendule d'être utilisé pour réguler la marche des horloges à partir de la fin du XVII^{e} siècle. Ces horloges ont été appelées par la suite « pendules » au féminin. La boule du pendule descend sous l'effet de la pesanteur qui l'attire vers la verticale du point de suspension, puis remonte grâce à sa vitesse (figure a ci-dessous). Le plan d'oscillation est donc déterminé par cette verticale et par la position initiale de la boule. Examinons d'abord ce qui se passe quand on fait osciller un pendule au pôle Nord ou au pôle Sud. En ces deux points, la verticale est l'axe de rotation de la Terre. Quand la Terre tourne, le plan d'oscillation du pendule ne change pas. Mais l'expérimentateur terrestre qui tourne avec la Terre le voit tourner *vers l'ouest* (figure b).



Un pendule au pôle Nord.

(a) Oscillation du pendule.
(b) Un observateur situé à la verticale du pôle voit le pendule osciller constamment dans le même plan et la Terre tourner d'ouest en est. L'observateur au sol, qui tourne avec la Terre, voit le plan d'oscillation tourner vers l'ouest à raison de 15° par heure.

S'il est très patient et s'il est habillé chaudement, il le verra revenir au point de départ au bout de 24 heures : aux pôles, la rotation du plan d'oscillation du pendule reproduit exactement la rotation de la Terre, mais en sens contraire. Ailleurs sur Terre, la direction de la verticale varie quand la Terre tourne, et le plan d'oscillation du pendule tourne moins vite : il effectue un tour complet en $24\ \text{h}/\sin\tau$, où τ est la latitude (figure du cadran équatorial page 28). Léon Foucault en fit la démonstration à Paris en 1851, devant un nombreux public. Le pendule était une boule de plomb de 28 kg, suspendue au plafond de la coupole du Panthéon par un fil métallique de 67 m de long. Si on arrivait à se persuader que le pendule oscillait dans un plan fixe et si on était patient, on se « voyait » tourner avec la Terre. Le plan d'oscillation effectuait un tour complet en 32 h environ, ce qui correspond bien à la valeur calculée à la latitude de Paris, $\tau = 49°$. À l'équateur, la latitude est nulle et cette formule donne une durée infinie. Effectivement, le plan d'oscillation du pendule ne change pas à l'équateur. À cet endroit, ce n'est pas la bonne méthode pour mettre en évidence la rotation de la Terre. Inversement, l'expérience de la boule lâchée du sommet de la tour ne donne rien aux pôles et son effet est maximum à l'équateur. Les deux expériences se complètent.

© Getty Images

L'expérience du pendule de Foucault est actuellement visible au Panthéon (photo) au musée des Arts et Métiers et au palais de la Découverte.

La parallaxe des étoiles

Le modèle héliocentrique a été rejeté pendant très longtemps à cause de l'absence d'effet de parallaxe. Galilée avait remarqué que les planètes apparaissaient comme des petits disques quand on les observait à la lunette, mais que les étoiles restaient des points lumineux. Il en avait déduit que les étoiles étaient beaucoup plus éloignées que les planètes, ce qui expliquait l'absence d'effet de parallaxe. On lui a rétorqué que la lunette déformait la réalité, et il n'y avait rien à répondre à cet argument d'autorité.

La première mesure de la parallaxe d'une étoile a été réalisée en 1838 par l'astronome allemand Friedrich Bessel. Ce dernier a montré que les directions d'une étoile de la constellation du Cygne, mesurées à 6 mois d'intervalle, différaient de 0,314 seconde d'arc. Il en a déduit que cette étoile était située à une distance 700 000 fois plus grande que le rayon de l'orbite terrestre.

Photo Jérôme Astréoud

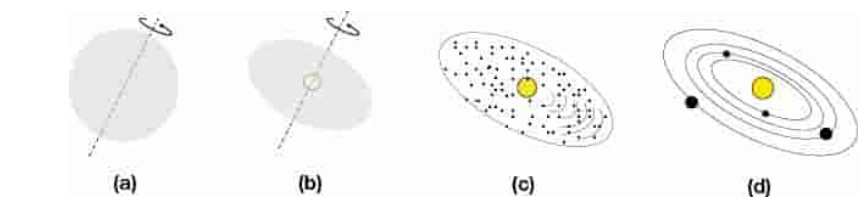
Une constellation d'étoiles bleues facile à identifier : les Pléiades.

Comment le système solaire s'est-il formé ?

Les progrès de l'instrumentation ont permis de découvrir les planètes invisibles à l'œil nu : Uranus en 1781, Neptune en 1846 et Pluton en 1930. Le déplacement de toutes les planètes du système solaire sur leurs trajectoires est parfaitement décrit par la loi de la gravitation universelle énoncée par Newton. Mais comment ce système s'est-il formé ? Les astronomes savent depuis longtemps que ces trajectoires sont pratiquement situées dans le même plan, que les planètes tournent dans le même sens et que ce sens est aussi celui de la rotation du Soleil sur lui-même. L'image qui vient à l'esprit est celle d'une immense toupie aplatie. Mais les éléments d'une toupie sont solidaires et tournent ensemble, ce qui n'est pas le cas des planètes : elles tournent indépendamment les unes des autres, même si leurs interactions perturbent légèrement la marche imposée par le Soleil. Leur année, que l'on appelle « la période de révolution », est d'autant plus longue que la planète est éloignée du Soleil. Mais cela suggère quand même que le Soleil et les planètes se sont formés ensemble à partir de « quelque chose » qui tournait. Laplace y pensait déjà à la fin du XVIII^{e} siècle. Il imaginait que le système solaire s'était formé à la suite de l'effondrement d'une « nébuleuse primitive » de gaz dû aux forces de gravité. C'était un bon début, mais les connaissances de l'époque ne permettaient pas d'aller beaucoup plus loin.

Les débuts de l'histoire

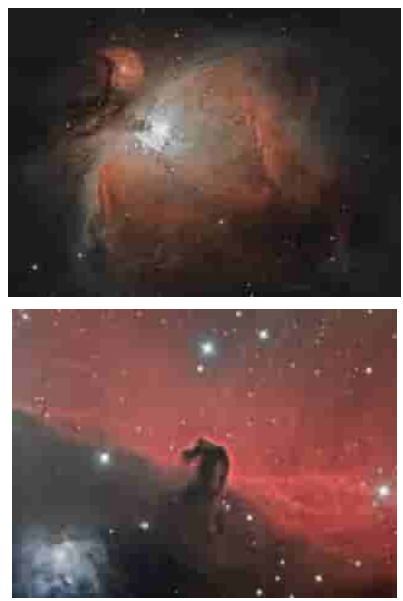
Nous disposons actuellement des informations fournies par les observatoires terrestres et les instruments embarqués dans les stations orbitales, ainsi que des nombreuses données obtenues par les sondes spatiales. Nous savons, en particulier, que l'espace interstellaire est rempli de gaz et de poussières. Le gaz contient surtout de l'hydrogène et de l'hélium issus du Big Bang, mais aussi des atomes fabriqués dans les étoiles ainsi que des molécules synthétisées dans l'espace interstellaire. La poussière interstellaire est faite de microscopiques grains solides, principalement des ions silicates et carbonates, enrobés de petites molécules comme H_2O, CO, NH_3 ou CH_4 sous forme de glaces. C'est la matière première qui a servi à construire les planètes. Voici comment on se représente actuellement la formation du système solaire.



Les principales étapes de la formation du système solaire.

a) Un « nuage moléculaire » en rotation s'effondre sur lui-même.
b) Sa matière s'organise en un disque de gaz et de poussières et un cœur qui s'échauffe.
c) Le Soleil brille et des grains de matière s'agglomèrent en planétésimaux.
d) L'accrétion des planétésimaux conduit à la formation des planètes.

Il y a 4,56 milliards d'années, un « nuage moléculaire », c'est-à-dire une partie du milieu interstellaire plus dense que les autres, tournait lentement dans un bras de notre Galaxie. Ce « nuage » a commencé à s'effondrer sur lui-même sous l'effet des forces de gravité, et sa rotation s'est accélérée. Au centre, la densité et la température de la matière ont augmenté considérablement. Quand la température a atteint dix millions de degrés, des paires de protons ont fusionné pour former un noyau d'hélium. Les réactions thermonucléaires ont démarré et la contraction s'est arrêtée : l'étoile Soleil était née.



Photos Jérôme Astréoud

Des nuages moléculaires pépinières d'étoiles dans la constellation d'Orion : grande nébuleuse et nébuleuse de la Tête de Cheval.

Les planètes

La périphérie du « nuage », moins chaude, s'est aplatie en formant un disque de gaz et de poussières : voilà la pseudo-toupie ! Le disque s'est peu à peu refroidi et sa matière s'est condensée sous forme d'une multitude de minuscules grains de matière qui tournaient autour du jeune Soleil. Avec le temps, ces grains se sont agglomérés sous l'effet de la gravité, formant des « planétésimaux », des blocs solides de dimension hectométrique à kilométrique. Lorsque deux planétésimaux

se rencontraient, ils se fondaient parfois pour former un corps plus gros. C'est ce phénomène d'« accrétion » qui a conduit progressivement à la formation des planètes. On considère que l'ensemble de ces processus a duré environ 100 millions d'années, ce qui est très court par rapport à l'âge du système solaire. Les planètes ne sont pas identiques : il y en a des petites et des grosses, des dures et des molles, de toutes les couleurs. Certaines ont même des anneaux… On ne connaît pas encore l'origine de toutes ces particularités, mais on sait que deux facteurs ont joué un rôle très important dans l'évolution ultérieure des planètes : la proximité du Soleil et la masse.

• Près du Soleil, les molécules les plus légères, hydrogène et hélium, avaient une vitesse suffisante pour s'échapper. Les planètes les plus proches du Soleil, dites telluriques (Mercure, Vénus, la Terre et Mars), sont donc principalement faites d'atomes lourds. Les plus éloignées (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune) ont conservé leurs atomes légers et sont essentiellement composées d'hydrogène et d'hélium.

• L'importance de la masse apparaît quand on compare l'évolution de la Terre et celle de Mars. Au début, elles possédaient toutes les deux une enveloppe gazeuse. La Terre est la plus grosse planète tellurique, et la gravité l'a aidée à retenir son atmosphère. Mais il y a autre chose : le cœur de notre planète est constitué d'un noyau métallique très chaud. Une partie du noyau est fluide, et ses mouvements produisent le champ magnétique qui agit sur nos boussoles. Mais le champ magnétique a un autre effet, beaucoup plus important : il dévie le flux de particules chargées que le Soleil nous envoie en permanence, le « vent solaire ». Sans ce « bouclier magnétique », ce vent soufflerait notre atmosphère. La Terre s'est refroidie lentement, elle a conservé un noyau partiellement fluide et son champ magnétique. La planète Mars, dix fois moins massive que la Terre, s'est refroidie plus vite, et son noyau métallique s'est solidifié. Son champ magnétique a disparu, et avec lui la protection vis-à-vis du vent solaire. Mars ne possède plus qu'une atmosphère très ténue.

Mais aussi…

Vent solaire et aurores polaires

Le vent solaire est un flux de protons, d'électrons et d'ions animés d'une très grande vitesse. À l'approche de la Terre, la plupart de ces particules sont déviées par le champ magnétique terrestre. Certaines pénètrent dans la haute atmosphère, généralement au niveau des zones de latitude élevée. Vers 150 km d'altitude, elles entrent en collision avec les atomes d'azote et d'oxygène de l'ionosphère et leur communiquent de l'énergie. Ceux-ci passent

dans des états « excités » très instables et se désexcitent en émettant des radiations de diverses longueurs d'onde qui colorent le ciel : les aurores polaires.

Photo Benoît Angles

Aurore boréale.

La couleur verte est due à la désexcitation des atomes d'oxygène.

Astéroïdes, comètes et météorites

Tous les grains de matière et tous les planétésimaux ne se sont pas agglomérés dans les planètes. Il en reste beaucoup, et même des gros, qui gravitent autour du Soleil : les « astéroïdes », qui sont pour la plupart groupés dans une « ceinture » entre Mars et Jupiter, et les comètes, caractérisées par des trajectoires elliptiques très allongées. À l'approche du Soleil, la sublimation des glaces génère une chevelure et deux longues « queues » de gaz et de poussières qui rendent visibles les plus grosses.

Lors de la collision entre astéroïdes, ou entre astéroïdes et comètes, des fragments plus ou moins gros sont éjectés et certains parviennent sur la Terre : les météorites. D'autres fragments proviennent d'impacts avec la Lune ou Mars. En traversant notre atmosphère, les fragments les plus petits s'échauffent et brûlent en donnant des « étoiles filantes ». Les plus gros se couvrent d'une croûte de fusion qui protège leur matière interne et tombent sur le sol en creusant des cratères. Les astéroïdes, les comètes et les météorites sont des témoins de la formation du système solaire. Ils sont très étudiés et on y a trouvé des molécules qui ont pu contribuer à l'apparition de la vie sur Terre (voir également partie 5).

Photo Jérôme Astréoud

La comète Néowise. La photo a été prise en juillet 2014.

Compléments

www.lienmini.fr/39798-cpltsP44

Les définitions successives de la seconde
Évaluation de la déviation vers l'est

Se repérer en mer avec les astres

– Je commence à croire que le chevalier de Hadoque s'est payé notre tête…

– Je commence à le croire, en effet…

– Nous allons bien voir ! Il doit être près de midi. Nous allons faire le point. Je vais chercher mon sextant. Voilà… Rentrons, maintenant. Je vais faire mes calculs… Voici notre position : 20° 37' 42'' de latitude nord, 71° 2' 28'' de longitude ouest.

Hergé, Le Trésor de Rackham le Rouge

Comment se repérait-on dans l'Antiquité ?

Les astronomes de l'Antiquité mesuraient la *hauteur* des astres, c'est-à-dire l'angle que fait leur direction avec le plan horizontal (figure page 38). La hauteur du Soleil était donnée par le rapport de la hauteur d'un gnomon à la longueur de son ombre. Pour les étoiles et les planètes, on utilisait une tige dont les extrémités étaient équipées d'œilletons de visée. Elle était montée sur un dispositif qui permettait de faire varier son inclinaison par rapport à l'horizontale et de la faire tourner autour d'un axe vertical. Bien entendu, il n'était pas question d'utiliser cet instrument sur un bateau. À cette époque, les seuls instruments de navigation étaient une sonde pour détecter les hauts-fonds et une clepsydre pour mesurer les durées. Les pilotes se repéraient en observant l'aspect des côtes et des îles, la direction du vent et des courants, et les mouvements des astres.

Naviguer en Méditerranée

Tant qu'on se contentait de longer les côtes, on utilisait des repères bien visibles et identifiables : les « amers » (les grandes falaises, les collines et les montagnes, les îles, et même les constructions humaines). Pour faciliter la navigation nocturne, on a construit très tôt sur le littoral et à l'entrée des ports des phares éclairés la nuit par des feux. Le plus célèbre est celui d'Alexandrie, haut d'une centaine de

mètres, construit vers 300 avant notre ère.

© Getty Images

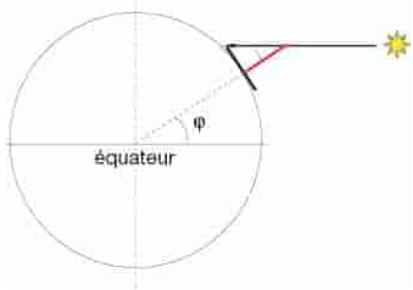
Reconstruction en image du phare d'Alexandrie.

On pouvait encore le voir au Moyen Âge, mais il a été détruit plus tard par des tremblements de terre. Les fouilles sous-marines entreprises à partir des années 1960 ont permis de retrouver de nombreux vestiges qui donnent une idée de ce qu'était ce monument extraordinaire, qualifié de septième merveille de l'Antiquité.

En pleine mer, on utilisait des repères astronomiques : dans la journée les directions du levant et du couchant, la nuit celle du nord, c'est-à-dire de l'axe de la Terre. Cet axe pointe actuellement vers l'étoile Polaire, qui est facile à identifier, mais ce n'était pas le cas il y a 2 300 ans : à cause du mouvement de précession (focus page 39), l'axe de la Terre pointait alors vers une partie du ciel où aucune étoile n'était visible à l'œil nu. Les navigateurs estimaient la direction du nord en se basant sur les étoiles dites « circumpolaires », comme celles de la Grande et de la Petite Ourse. Dans ces conditions, chaque voyage de plusieurs jours était une aventure. Mais la géographie de la Méditerranée facilitait la navigation : c'est une mer fermée relativement petite, au rivage profondément découpé, qui est parsemée de nombreuses îles. Les Phéniciens et les Grecs l'ont explorée très tôt et y ont fondé des colonies lointaines, comme Massalia vers 600 avant notre ère.

Le périple extraordinaire de Pythéas

Pythéas vivait à Massalia au quatrième siècle avant J.-C. C'était un astronome renommé et un marin expérimenté. Il avait fait bâtir un obélisque qu'il utilisait comme gnomon, et il avait mesuré la latitude de Massalia avec une erreur inférieure à deux minutes d'angle.



Mesure de la latitude les jours d'équinoxe à midi avec un gnomon.

La figure est dans le plan méridien. Les jours d'équinoxe, à midi, la direction du Soleil est parallèle à l'équateur et fait avec la verticale un angle égal à la latitude τ du lieu.

Il avait déduit de ses observations que l'axe de la Terre pointait vers le quatrième sommet d'un quadrilatère dont les trois autres sommets étaient faciles à repérer, ce qui lui permettait de déterminer avec précision la direction du nord. Vers 330 avant J.-C., il quitta Massalia à bord d'un bateau à voile, équipé d'avirons pour avancer par vents contraires. Il fit le tour de la péninsule Ibérique, traversa le golfe de Gascogne et atteignit la pointe de la Bretagne. Il traversa ensuite la Manche et rejoignit l'actuelle Angleterre. Il longea sa côte sud, remonta sa côte est, et arriva aux îles Shetland. Il fila ensuite vers le nord et atteignit une côte où la nuit ne durait que deux heures, un phénomène que ses connaissances astronomiques lui permettaient de comprendre. Ce pouvait être l'Islande, la mythique Thulé, ou la côte de Norvège. Il aurait même vu la banquise ! À son retour à Massalia, personne ne l'a cru quand il a raconté ce qu'il avait vu. Ce qu'il disait sur les marées, qu'il attribuait fort justement à la Lune, le soleil de minuit, la banquise, tout cela était incompréhensible pour ses contemporains. Pythéas a décrit son voyage dans un ouvrage qui a été commenté et critiqué pendant six siècles avant de disparaître dans un incendie. Les grands astronomes grecs qui lui ont succédé, comme Ératosthène et Hipparque, admiraient son œuvre. On s'accorde de nos jours à reconnaître la véracité de la plupart de ses découvertes.

Et à l'époque des grandes découvertes ?

Les voyages d'exploration partis d'Espagne et du Portugal qui se sont succédé pendant une trentaine d'années à la fin du XVe siècle et au début du XVIe siècle, ont bouleversé la vision que l'on avait de la Terre.

Focus

Les principales étapes des grandes découvertes

1488 : Bartholomeu Dias atteint la pointe sud de l'Afrique.

1492 : Christophe Colomb traverse l'Atlantique et atteint une grande île qu'il baptise Hispaniola (Haïti-Saint Domingue).

1497 : Vasco de Gama double le cap de Bonne-Espérance et remonte la côte est de l'Afrique, ouvrant ainsi la voie vers l'Inde.

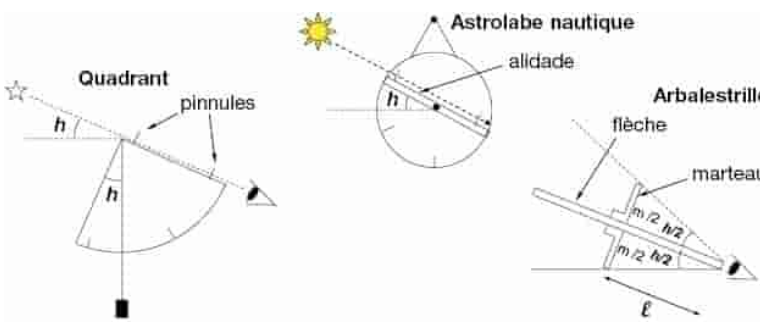
1502 : Amerigo Vespucci atteint la Guyane.

1519 : Première circumnavigation. Une flotte de cinq navires quitte Séville sous la direction de Magellan. Un seul revient en 1522 après avoir fait le tour du monde. Pendant le voyage, Magellan et de nombreux marins avaient été tués ou étaient morts de maladie.

Plusieurs facteurs ont contribué à la réussite de ces expéditions : la rivalité des souverains du Portugal et de l'Espagne, mais aussi les progrès très importants réalisés dans deux domaines essentiels : la conception de navires adaptés aux voyages au long cours et aux fréquentes manœuvres, et les méthodes de repérage en mer.

De nouveaux instruments pour mesurer la hauteur des astres

Les premiers instruments destinés à mesurer la hauteur des astres à bord des navires sont représentés ci-dessous.



Instruments de visée destinés à mesurer la hauteur *h* d'un astre au-dessus de l'horizon.

On ignore par qui et à quel moment ils ont été inventés, mais on sait que les grands navigateurs des XVe et XVIe siècles les ont utilisés. On lit directement sur leur cadran l'angle entre la direction visée et la verticale matérialisée par un fil à plomb. Avec le quadrant et l'astrolabe nautique, on vise l'astre à travers deux *pinnules* et on lit la hauteur *h* sur le bord gradué d'un arc de cercle, le *limbe*. Dans le cas

de l'astrolabe nautique, on tourne l'alidade jusqu'à ce que les rayons du Soleil passent par les deux pinnules et viennent éclairer le limbe. La précision de la mesure dépend de la verticale qui est mal définie sur un bateau qui roule et qui tangue. De ce point de vue, l'arbalestrille est plus précise. Une barre transversale, le *marteau*, peut coulisser sur une barre de section carrée, la *flèche*. Pour mesurer la hauteur d'un astre, on vise l'horizon avec le bord inférieur du marteau, et on fait coulisser le marteau de telle sorte que le bord supérieur soit dans la direction de l'astre. D'après la définition de la tangente en trigonométrie, on a :

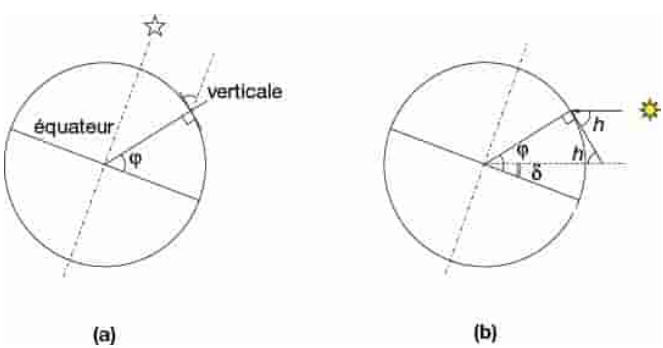
$$\tan (h/2) = (m/2)/\ell$$

La longueur m du marteau étant connue, la mesure de ℓ sur la flèche permet de déterminer h. Avec ces instruments, la précision était de l'ordre du degré, à peu près deux fois le diamètre apparent du Soleil et de la Lune.

La détermination de la latitude

La latitude est l'angle τ entre la verticale du lieu et le plan de l'équateur (figure page 54). Les astronomes grecs savaient la déterminer en mesurant la nuit l'angle entre l'horizon nord et la direction de l'axe de la Terre (figure a ci-dessous). Même si cette direction était mal définie sur la voûte céleste à cette époque, ils avaient constaté que la latitude diminuait quand on se déplaçait vers le sud et en avaient tiré un argument supplémentaire en faveur de la rotondité de la Terre.

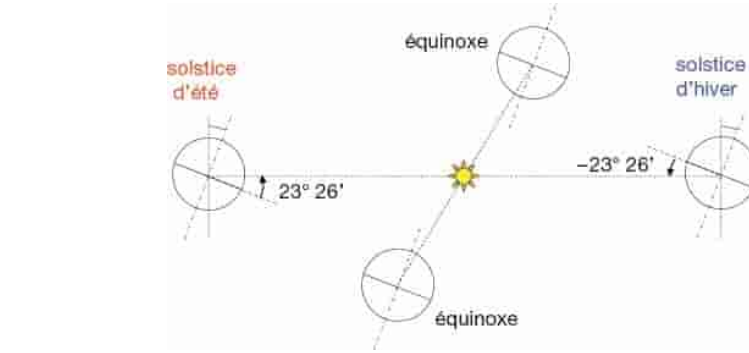
La situation était différente à la fin du XVe siècle : l'axe de la Terre pointait vers l'étoile Polaire et on pouvait déterminer précisément la latitude en mesurant sa hauteur au-dessus de l'horizon nord. On pouvait aussi la déterminer en mesurant la hauteur h du Soleil à midi. En effet, en écrivant que la somme des angles du triangle rectangle représenté sur la figure b est égale à 180°, on obtient $\tau = (90 - h) + \delta$.



Détermination de la latitude τ du lieu (a) la nuit et (b) à midi.

L'axe de la Terre est en points tirets. La figure (b) est dans le plan méridien.
(a) Les deux angles marqués sur la figure, dont les côtés sont respectivement perpendiculaires, sont égaux.
(b) L'angle *h* entre la direction du Soleil et l'horizon sud est sa *hauteur*. L'angle δ entre la direction du Soleil et l'équateur est sa *déclinaison*.

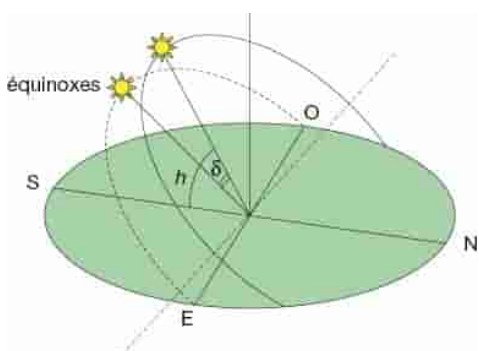
Cette méthode nécessite de connaître la déclinaison δ du Soleil. Elle varie pendant l'année entre – 23° 26' au solstice d'hiver et + 23° 26' au solstice d'été. En valeur absolue, ces nombres représentent l'inclinaison de la Terre par rapport à la perpendiculaire au plan de l'écliptique (figure page suivante).



Valeurs extrêmes de la déclinaison du Soleil au cours de l'année.

Les directions de la Terre par rapport au Soleil sont représentées en tirets. Elles matérialisent le plan de la trajectoire de la Terre, l'écliptique. L'axe de la Terre est en points tirets. Les jours de solstice, l'angle entre la direction du Soleil et l'équateur est égal en valeur absolue à l'inclinaison de l'axe de la Terre par rapport à la perpendiculaire au plan de l'écliptique (pointillés). La déclinaison est positive au solstice d'été, négative au solstice d'hiver. Les jours d'équinoxe, le Soleil est dans le plan de l'équateur et la déclinaison est nulle.

La déclinaison est nulle les jours d'équinoxe où le Soleil est dans le plan de l'équateur. Pour connaître la déclinaison un autre jour, on mesure la hauteur du Soleil à midi ce jour-là et on retranche la hauteur mesurée les jours d'équinoxe. Le résultat ne dépend pas du lieu de la mesure.



Mesure de la déclinaison du Soleil.

Les jours d'équinoxe, la trajectoire apparente du Soleil est dans un plan parallèle à celui de l'équateur. La déclinaison du Soleil est nulle. Sa valeur un autre jour est égale à la différence entre les hauteurs du Soleil à midi ce jour-là et les jours d'équinoxe.

La déclinaison du Soleil est tabulée.

Focus

Extrait de la table de déclinaison du Soleil

La déclinaison varie peu d'un jour à l'autre aux solstices, où elle passe par un extremum, mais elle varie rapidement (24 minutes par jour) et change de signe les jours d'équinoxe.

Nous avons vu que les instruments de la figure de la page 55 permettaient de mesurer la hauteur des astres avec une précision de l'ordre du degré. Puisqu'un méridien de 360° mesure environ 40 000 km, la longueur d'un arc de méridien de un degré est égale à 111 km. Telle est la précision que l'on pouvait attendre de ces mesures.

L'expédition très hasardeuse de Christophe Colomb

Tout le monde ne sait pas que Christophe Colomb s'est lancé dans la traversée de l'océan à la suite d'une grossière erreur dans l'évaluation des distances. Les Grecs avaient évalué la circonférence terrestre à environ 46 000 km, un peu plus que la vraie valeur 40 000 km. Mais au XV^e^ siècle, on avait oublié cette mesure depuis longtemps et on pensait qu'elle était beaucoup plus petite, environ 30 000 km. De plus, on estimait que le continent eurasiatique s'étendait sur 225° environ entre l'Espagne et la Chine, alors que la vraie valeur est plutôt 130°. En se basant sur ces chiffres complètement faux, Christophe Colomb pensait qu'il suffisait de parcourir environ 8 000 km vers l'ouest pour atteindre la Chine. Or la vraie distance est plutôt de l'ordre de 20 000 km ! S'il l'avait su, il ne serait sans doute pas parti et n'aurait jamais découvert l'Amérique ! En revanche, sa stratégie était bonne. Elle consistait à longer les côtes vers le sud jusqu'aux îles Canaries, puis à filer plein ouest en profitant des vents alizés. Il fallait tout de même garder le cap avec une boussole et vérifier la latitude de temps en temps. La boussole, inventée par les Chinois vers le IV^e^ siècle, avait été introduite par les Arabes en Europe où elle était utilisée pour la navigation depuis le XIII^e^ siècle. Pour déterminer la latitude, les navigateurs disposaient des instruments représentés sur la figure de la page 55 et ils possédaient des tables de déclinaison du Soleil.

Boussole actuelle munie d'un système de visée.

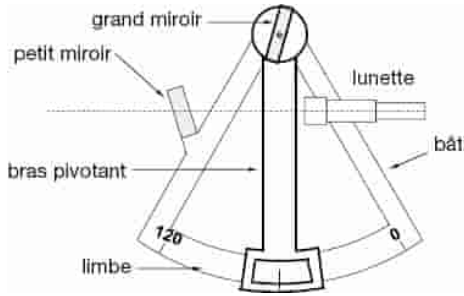
Christophe Colomb voulait absolument évaluer sa progression vers l'ouest, ne serait-ce que pour entretenir le moral de l'équipage. Il n'y avait à l'époque aucun moyen pour déterminer la longitude, et on évaluait la distance parcourue « à l'estime », à partir de la vitesse du bateau et des durées écoulées entre les changements de cap successifs. On mesurait ces durées avec un gros sablier qu'il fallait retourner toutes les demi-heures, mais on ne sait pas exactement comment on déterminait la vitesse. On imagine qu'un marin jetait un objet en bois à la proue du bateau et que le pilote placé à la poupe comptait dans sa tête jusqu'à ce que l'objet arrive à sa hauteur. Le pilote pouvait estimer sa vitesse à partir de cette durée et de la longueur du bateau. Une méthode plus précise, le « loch », a été mise au point à la fin du XVI^e^ siècle : on jetait à la poupe une planche attachée à une corde qui comportait des nœuds régulièrement espacés. La corde se déroulait. Au bout d'un certain temps, on ramenait la planche, on comptait les nœuds et on en déduisait la vitesse. Cette méthode est à l'origine du *nœud*, une unité de vitesse égale à un mille marin par heure.

De quand datent les techniques de repérage modernes ?

Les progrès très importants accomplis au XVIII^e^ siècle ont déterminé la façon de se repérer en mer jusqu'au début du XX^e^ siècle.

Une belle invention : le sextant

Le sextant, inventé en 1731 de façon indépendante par l'Anglais John Hadley et l'Américain Thomas Godfrey, a considérablement amélioré la précision de la mesure de la hauteur des astres. Il comporte un bâti triangulaire sur lequel un bras mobile peut pivoter.



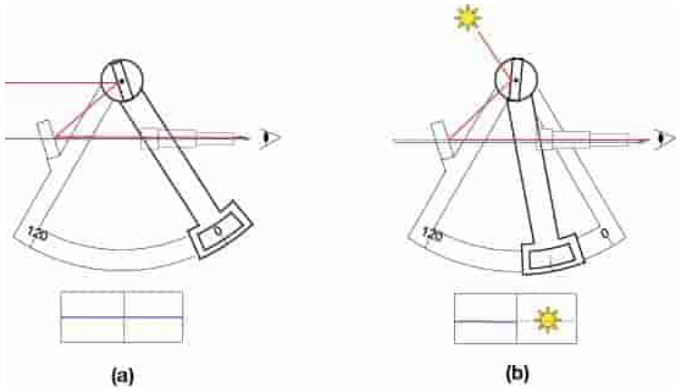
© Getty Images

Le sextant.

Les deux miroirs sont perpendiculaires au plan de la figure. Le bras mobile est en traits épais.

Le bâti porte le « petit miroir » qui est divisé en deux parties. La partie gauche, transparente, montre l'horizon. Sur la partie droite, semi-transparente, se superposent l'horizon et l'image réfléchie par le grand miroir. Une lunette de visée est braquée sur le petit miroir. La partie inférieure du bâti est un limbe gradué de 0 à 120°. L'angle entre les bras du bâti est égal à 60°, d'où l'appellation de *sextant*, un sixième de cercle. Nous allons voir qu'il permet de mesurer des angles deux fois plus grands, ce qui explique sa graduation. Le bras mobile porte le « grand miroir » qui réfléchit la lumière qu'il reçoit vers le petit miroir. La partie inférieure du bras mobile est ajourée pour permettre la lecture des graduations du limbe. Avant chaque mesure, on amène le bras mobile sur la graduation 0 du limbe (figure a ci-dessous). Si l'appareil est bien réglé, les deux miroirs sont alors *parallèles* et on voit l'horizon sur les parties gauche et droite du petit miroir (bas de la figure a).

Pour mesurer la hauteur h d'un astre, on tourne le bras mobile jusqu'à ce que son image apparaisse au niveau de l'horizon sur la partie droite du petit miroir (bas de la figure b).



Utilisation du sextant.

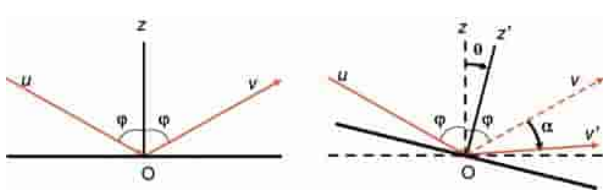
Le rectangle montre l'image du petit miroir vue dans la lunette.

Il faut pour cela faire tourner le bras de l'angle $h/2$ (focus ci-dessous). En pratique, on ajuste finement la position du bras avec une vis micrométrique, on le bloque, et on lit la valeur de h sur le limbe. Le grand avantage du sextant, c'est qu'il permet de comparer directement les directions de l'astre et de l'horizon, même si le bateau bouge. Le bâti porte des filtres que l'on intercale devant les miroirs pour mesurer la hauteur du Soleil. Dès les premiers essais, Hadley obtint une précision de quelques minutes d'angle, cent fois meilleure que celle des instruments de la figure page 55. En termes de distance, elle correspond à un arc de méridien d'environ un kilomètre.

Focus

De combien tourne un rayon réfléchi quand on fait tourner un miroir ?

La figure montre les directions de la normale au miroir et du rayon réfléchi, avant et après rotation de l'angle θ. En écrivant que les angles d'incidence (Ou, Oz') = τ + θ et de réflexion (Oz', Ov') = (τ − θ) + α sont égaux, on obtient α = 2θ : *le rayon réfléchi tourne deux fois plus que le miroir*.



Le problème de la longitude

Il a fallu plus de temps pour mesurer correctement la longitude, même si la bonne méthode était connue depuis longtemps. Si un observateur B est situé 15° à l'ouest de A, son heure locale, celle de son cadran solaire, retarde de une heure par rapport à celle de A. Inversement, on peut déterminer la différence des longitudes de deux points en comparant leurs heures locales. Pour connaître sa longitude, le capitaine du bateau doit comparer son heure locale à l'heure indiquée par une horloge qui « garde » l'heure du point de départ. Le problème, c'est la *précision*. Supposons que l'on veuille mesurer la longitude avec une précision de *un demi-degré*, ce qui correspond à une distance de 55 km environ à l'équateur. Ailleurs, la distance est plus petite, puisqu'il faut multiplier par le cosinus de la latitude. Elle est égale à 39 km à la latitude de 45°, ce qui laisse encore une grande incertitude sur la position d'un bateau. Et pourtant, en 1714, le Parlement anglais offrit une récompense de 20 000 livres, une petite fortune, à celui qui trouverait le moyen de mesurer la longitude avec une précision de un demi-degré ! On considérait donc à cette époque que cette précision était très difficile à obtenir. Pour comprendre pourquoi, il faut calculer ce qu'elle impose sur la mesure du temps.

Le Soleil tourne de 15° par heure. Pour obtenir la longitude avec une précision de un demi-degré, il faut donc connaître la différence entre l'heure locale et l'heure du point de départ avec une précision de 2 minutes. Commençons par l'heure locale : il est midi à l'instant où le Soleil passe au sommet de sa trajectoire. Pour déterminer cet instant avec précision, on utilise le fait que la trajectoire est symétrique par rapport au plan méridien (figure page 23) : on repère sur une montre les instants où il passe en deux points de même hauteur, un peu avant et un peu après sa culmination, et on obtient le midi local en faisant la moyenne des deux temps. Avec un sextant, cette mesure est très précise. La difficulté ne vient donc pas de l'heure locale, mais de l'horloge qui doit « conserver » l'heure du point de départ pendant toute la durée du voyage. Pour que sa dérive soit inférieure à 2 minutes après deux mois de navigation, elle ne doit pas dépasser 2 secondes par jour malgré les trépidations du navire et la corrosion de l'air marin ! Au XVIII^{e} siècle, la réalisation d'un tel chronomètre était un véritable défi technologique. Le plus performant fut réalisé en 1760 par un horloger anglais autodidacte, John Harrison. Après deux mois de navigation, l'heure de son modèle H4 ne différait de celle d'une pendule restée au port que de 5 secondes. On peut admirer ce magnifique instrument au National Maritime Museum de Londres. En théorie, le problème de la longitude était donc résolu. Mais les chronomètres de marine précis étaient très coûteux, et les capitaines répugnaient à faire des mesures qui exigeaient beaucoup de précision et donc de temps. On a continué encore longtemps à naviguer à

l'estime.

Mais aussi…

Nicolas Le Floch et la mesure de la longitude

La réalisation d'un chronomètre de marine assez précis pour permettre la détermination de la longitude intéressait beaucoup les marines française et anglaise. Dans son roman *Le Cadavre anglais*, Jean-François Parrot entraîne son héros, commissaire de police au Châtelet, dans une enquête à multiples rebondissements dans le contexte de la rivalité entre horlogers français et anglais.

L'utilisation de la latitude et de la longitude pour se repérer en mer a conduit à définir des unités de distance et de vitesse adaptées à la navigation : le *mille marin* est la distance qui sépare deux points d'un méridien dont les latitudes diffèrent d'une minute d'arc. Un petit calcul montre qu'il est égal à 1 853 m. Le *nœud* est une unité de vitesse égale à un mille par heure.

Complément

www.lienmini.fr/39798-cpltsP57

Comment trouver le nord avec une montre à aiguilles ?

2

L’eau sur Terre

L'eau, un liquide extraordinaire

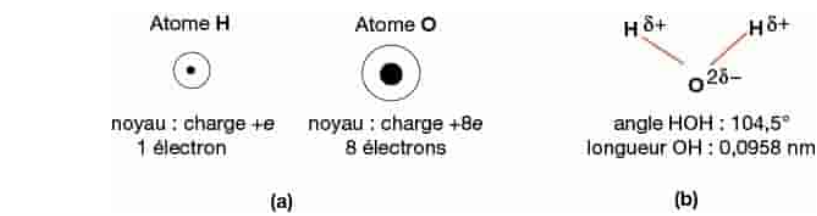
Dès qu'elle est sous les arbres, l'eau joue avec tout ce qu'elle rencontre : ici, elle mime un miroir qu'une main irritante agite ; là, dans le filet du courant le long d'une pierre très lisse, elle simule un reflet de couleuvre ; ailleurs, elle fait semblant de dormir ; ou bien elle s'amuse d'une branche qui baigne dans le tourbillon de sa cascade ; ou bien, pour une pierre rencontrée, elle se disperse en gerbe ; si elle passe au-dessus d'un trou, elle s'étourdit à tournoyer jusqu'à l'écume.

Maurice Toesca, Rêveries d'un pêcheur solitaire

La molécule d'eau : qu'a-t-elle de remarquable ?

Structure de la molécule

La molécule d'eau est formée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène. L'atome d'hydrogène possède un noyau qui porte une charge positive élémentaire, et un électron qui porte une charge négative élémentaire. Le noyau de l'atome d'oxygène porte 8 charges positives élémentaires, et il est entouré de 8 électrons (figure a page suivante). La molécule d'eau est électriquement neutre. Mais la densité des électrons est nettement plus forte du côté de l'oxygène, et moins d'un électron en moyenne entoure chaque noyau d'hydrogène : dans la molécule H_2O, les deux sites H sont chargés positivement et le site O est chargé négativement. Cette distribution dissymétrique est symbolisée par les signes δ^+ et $2\delta^-$ sur la figure b. On dit que la molécule d'eau est *polaire*.



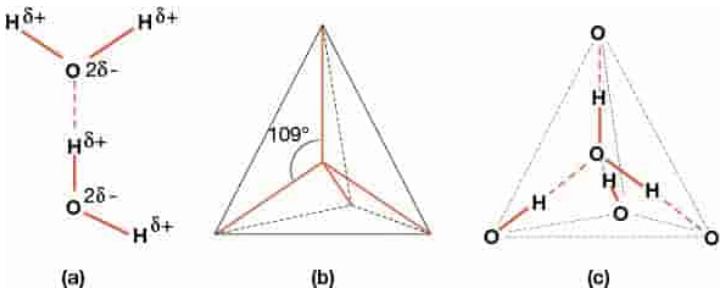
La molécule d'eau.

(a) Les atomes d'hydrogène et d'oxygène. *e* est la charge électrique élémentaire.
(b) Répartition des charges et géométrie de la molécule.

La molécule d'eau absorbe faiblement les radiations du spectre visible. Cette absorption colore parfois l'eau à l'état liquide et solide, mais à l'état gazeux l'eau est *invisible*.

La liaison hydrogène

En phase condensée, liquide ou solide, les sites $O^{2\delta-}$ des molécules forment des *liaisons hydrogène* avec les sites $H^{\delta+}$ d'autres molécules. La liaison est la plus forte quand les sites O, H, O sont alignés (figure a ci-dessous), mais elle possède une certaine flexibilité. L'angle HOH d'une molécule est très proche de l'angle 109° qui caractérise la géométrie du tétraèdre régulier (figure b). Cette propriété favorise l'organisation de la figure c dans laquelle une molécule est liée à 4 autres molécules dont les sites oxygène occupent les sommets d'un tétraèdre régulier.



Formation de liaisons hydrogène en phase condensée.

(a) Liaison hydrogène (pointillés) entre deux molécules d'eau.
(b) Géométrie du tétraèdre régulier.
(c) Organisation tétraédrique des molécules d'eau : celle qui est au centre est liée à 4 molécules dont les sites O occupent les sommets d'un tétraèdre.

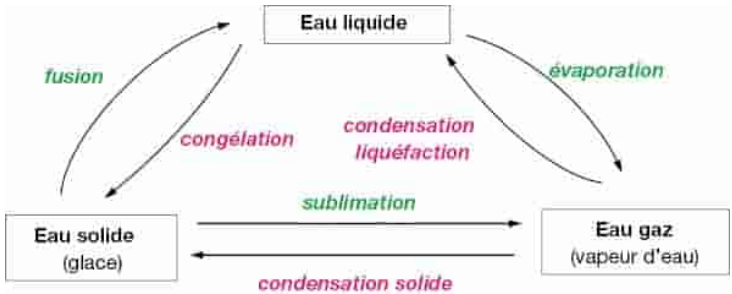
• Dans la glace, toutes les molécules sont organisées de cette façon. La structure cristalline dite hexagonale qui en résulte possède de nombreuses cavités, ce qui explique la faible densité de la glace.

• Dans l'eau liquide, les molécules forment des structures à base de liaisons hydrogène de façon transitoire. Ces structures se font et se défont continuellement, mais elles assurent la forte cohésion entre molécules qui est à l'origine de la plupart des propriétés particulières de l'eau liquide.

Dans quelles conditions l'eau change-t-elle d'état ?

L'eau est la seule substance présente sur Terre dans les trois états

solide, liquide et gazeux. Les changements d'état nécessitent des *transferts de chaleur*.



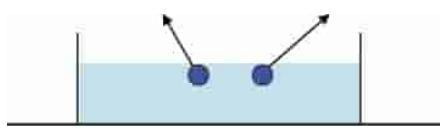
Les changements d'état de l'eau.

Les changements d'état qui absorbent de la chaleur sont en vert, ceux qui en dégagent sont en rouge.

C'est l'omniprésence de l'eau sur Terre et la facilité avec laquelle on peut repérer ses changements d'état, qui ont conduit Celsius à définir en 1742 une échelle de température centigrade basée sur la glace fondante et l'ébullition de l'eau. Les changements d'état de l'eau font partie de notre vie quotidienne, comme le montrent les exemples suivants.

Faire sécher le linge et souffler sur la soupe

L'eau s'évapore spontanément à toute température. Si une soucoupe d'eau est oubliée quelque part, on est certain de la retrouver vide au bout d'un certain temps. Mais quels sont les facteurs qui déterminent la *vitesse* d'évaporation ? Ce matin, j'ai sorti le linge de la machine à laver et je l'ai étalé sur un séchoir dans le jardin. Il y a du soleil et un peu de vent, et je sais d'expérience que tout sera sec ce soir. Pour quelle raison ? Dans le liquide, les molécules interagissent continuellement entre elles. De temps en temps, certaines ont assez d'énergie pour en sortir, et un peu de vapeur d'eau se forme à la surface.



L'évaporation de l'eau.

Plus la température de l'eau est élevée, plus les molécules ont d'énergie et plus l'évaporation est rapide. Cette « fuite » des molécules qui ont le plus d'énergie refroidit le liquide. Pour que l'évaporation continue, il faut un apport d'énergie. Les molécules qui s'accumulent à

la surface peuvent éventuellement revenir dans le liquide, mais un bon courant d'air suffit à les balayer. Les conditions qui favorisent une évaporation rapide sont donc les suivantes :

- une grande surface de contact avec l'air, pour accélérer la sortie des molécules ;
- de la chaleur, pour fournir de l'énergie ;
- du vent, pour évacuer la vapeur et éviter le retour des molécules dans le liquide.

On ressent l'effet du vent en sortant de l'eau sur la plage : la pellicule d'eau qui couvre notre corps s'évapore, ce qui la refroidit. De la chaleur passe de notre corps vers l'eau et nous avons une sensation de froid qui est plus forte s'il y a du vent. De même, l'évaporation de la sueur sécrétée par les pores de la peau rafraîchit notre corps. Et en soufflant sur la soupe, on évacue la vapeur formée au-dessus du liquide, ce qui accélère l'évaporation de l'eau et refroidit sa surface.

La tasse de café et les labours d'automne

Après le repas, j'observe le café que j'ai versé dans ma tasse. Des volutes blanchâtres s'élèvent au-dessus de la surface, puis disparaissent.

© Getty Images

Une tasse de café « fumante ».

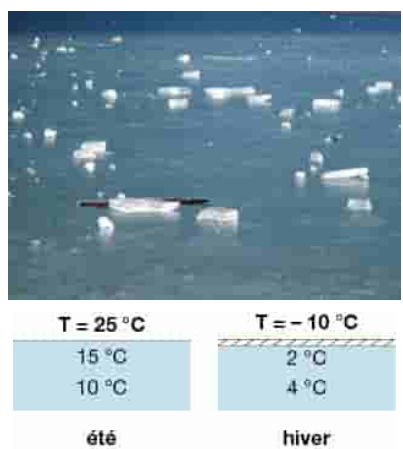
Ces volutes sont faites d'eau *liquide*. À la surface du café, des molécules d'eau s'évaporent et forment de la vapeur d'eau *invisible*. Plus chaude que l'air ambiant, elle s'élève sous l'effet de la poussée d'Archimède et se condense rapidement en un *brouillard* constitué d'une multitude de gouttelettes d'eau microscopiques. Il se passe la même chose quand on prend une douche : l'eau chaude du robinet s'évapore, et la vapeur d'eau se condense en gouttelettes sur les parois de la salle de bains qui sont plus froides. Sur le miroir, les gouttelettes forment de la *buée* qui fait disparaître les reflets. La nature nous offre aussi de nombreux exemples : en automne, on voit souvent les champs fraîchement labourés « fumer » au soleil. Le soleil chauffe la terre

humide, son eau s'évapore et se condense en se mélangeant à l'air froid. Nous verrons dans la partie 3 d'autres exemples qui impliquent des phénomènes à grande échelle.

La terre fraîchement retournée « fume » dans l'air froid.

Le gel d'un lac et d'une rivière

Quand l'eau liquide se refroidit, sa masse volumique augmente légèrement. Mais à partir de 4 °C, elle diminue jusqu'à 0 °C, où a lieu la congélation. L'existence d'un maximum de masse volumique de l'eau à 4 °C a des conséquences sur la vie aquatique dans les plans d'eau qui gèlent en hiver.



Exemples de variations de la température de l'eau d'un lac profond en été et en hiver.

En été, la température de l'air est plus élevée que celle de l'eau, et la température diminue quand la profondeur augmente. En hiver, la température de l'air est inférieure à celle de l'eau. L'eau la plus dense est à 4 °C. Au-dessus, l'eau est plus froide et gèle facilement au contact de l'air. La masse volumique de la glace étant inférieure à celle de l'eau, elle flotte. L'eau à 4 °C s'oppose au gel de toute la masse d'eau, et la vie aquatique peut continuer, même si c'est au ralenti. S'il neige, la glace couverte de neige constitue un couvercle isolant qui ralentit

encore le gel. Dans les rivières, le brassage de l'eau tend à égaliser les températures. L'eau commence à geler sur les bords, mais elle peut geler entièrement si le substrat sur laquelle elle coule est assez froid.

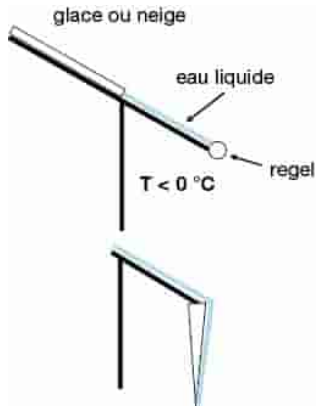
Mais aussi…

La lyophilisation

C'est un procédé de conservation des aliments par *déshydratation*. Les aliments sont congelés à – 40 °C, puis placés sous vide. La glace se sublime et la vapeur d'eau produite est évacuée. Le produit déshydraté, conditionné à l'abri de l'humidité et de l'air, conserve son arôme et sa saveur, et il est très léger. Ce procédé, mis au point en 1906 par A. d'Arsonval et F. Bordas, aurait été utilisé par les Indiens des Andes.

Comment se forment les stalactites de glace ?

En montagne, à l'approche du printemps, la neige qui s'est accumulée sur les toits commence à fondre dans la journée. À la tombée de la nuit, l'eau de fonte regèle à la limite du toit, où la température est la plus basse. Les jours suivants, l'eau liquide s'écoule le long de la glace et gèle à son contact, ce qui fait croître la stalactite.



Stalactites de glace dues à la fonte de la neige des toitures.

La photo montre qu'une faible brise suffit à la courber. Les cascades de glace proviennent de l'accrétion de stalactites géantes formées lors du gel des cascades.

Quelles sont les particularités de l'eau liquide ?

Les solides ont une forme bien définie parce que leurs constituants, atomes ou molécules, sont fortement liés entre eux. Dans un liquide, les liaisons entre molécules sont assez fortes pour assurer leur cohésion, mais pas assez pour empêcher les changements de forme. Comme les gaz, les liquides peuvent s'écouler facilement : ce sont des *fluides*. Mais contrairement aux gaz, les liquides conservent leur *volume* quand on les transvase, et leur surface au repos est plane et horizontale. Parmi les liquides, l'eau se distingue encore par ses caractéristiques particulières.

Nous avons vu que, contrairement à ce qui se passe pour les autres liquides, la masse volumique de l'eau passe par un maximum à 4 °C quand sa température diminue. Lors de la Révolution française, la volonté de définir des unités susceptibles d'être adoptées universellement a conduit à définir l'unité de *masse* à partir de l'eau : en 1799, le kilogramme fut défini comme la masse d'un décimètre cube d'eau pure à 4 °C. Un prototype composé de 90 % de platine et de 10 % d'iridium est conservé depuis 1889 au Bureau international des poids et mesures situé au pavillon de Breteuil à Sèvres.

Le pavillon de Breteuil à Sèvres.

La chaleur spécifique de l'eau est anormalement élevée pour un liquide, environ 4,18 kJ K^{-1} kg^{-1} : il faut fournir beaucoup d'énergie pour élever sa température et, une fois chaude, l'eau doit céder beaucoup d'énergie avant que sa température ne baisse. Cela explique l'inertie thermique des grandes masses d'eau des océans et le fait que les courants marins chauds et froids ne se mélangent pas facilement. C'est pour cette raison que l'eau sert à refroidir les moteurs et qu'elle joue le rôle de fluide « caloporteur » dans les systèmes de chauffage central.

Focus

Qu'est-ce que la calorie ?

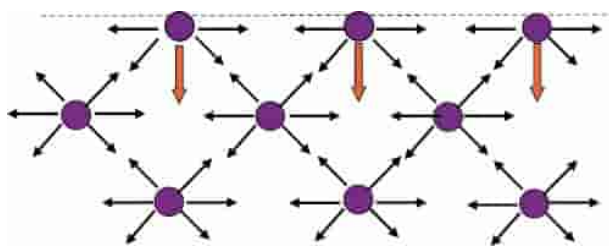
La calorie fut initialement la quantité de chaleur nécessaire pour faire passer un gramme d'eau de 14,5 °C à 15,5 °C. On a compris par la suite que la chaleur était une forme particulière d'énergie, et la chaleur spécifique (nom actuel : *capacité thermique massive*) s'exprime désormais en J K^{-1} kg^{-1}, sans référence à l'eau (voir Appendice page 334).

Une autre propriété remarquable de l'eau est sa très grande chaleur latente de vaporisation (nom actuel : *enthalpie de vaporisation*) : il faut fournir 2 260 kJ pour vaporiser 1 kg d'eau liquide à 100 °C. Elle est due à la nécessité de rompre les liaisons hydrogène pour faire passer

l'eau de l'état liquide à l'état gazeux. On a calculé qu'en absence de ces liaisons, la température d'ébullition de l'eau à la pression atmosphérique normale descendrait à – 80 °C environ. Mais on a aussi calculé que si ces liaisons étaient trop fortes, l'eau resterait sous forme de glace jusqu'à 100 °C ! La force des liaisons hydrogène est bien adaptée pour que l'eau reste *liquide* dans une large plage de température favorable à la vie sur Terre.

Tension superficielle, mouillage et capillarité

Les gouttes de pluie sont *sphériques*. On le vérifie en filmant leur chute, mais chaque apparition d'un arc-en-ciel le démontre : si les gouttes n'étaient pas parfaitement sphériques, il n'y aurait pas d'arc-en-ciel. Cette forme est due à une force qui tend à rendre la surface des liquides la plus petite possible : la *tension superficielle*. Son origine est expliquée schématiquement sur la figure de la page suivante. La surface plane d'un liquide se comporte un peu comme une membrane élastique : elle résiste quand on essaie de la déformer. La tension superficielle de l'eau est particulièrement élevée, et il est facile de la mettre en évidence : en procédant délicatement, on peut faire flotter à la surface d'un verre rempli à ras bord une épingle ou un petit trombone, dont la masse volumique est pourtant supérieure à celle de l'eau. En regardant de près, on constate que la surface de l'eau est *déformée* par l'objet.



Origine de la tension superficielle.

La cohésion d'un liquide est due aux forces d'attraction entre ses molécules. À l'intérieur, elles se compensent en moyenne, mais en surface, leur résultante (rouge) les tire vers l'intérieur.

Si on dépose une goutte d'eau sur une surface solide, elle perd sa forme sphérique : les forces d'adhérence à la surface et le poids de la goutte l'obligent à s'étaler plus ou moins. L'eau a, en effet, une forte affinité pour de nombreuses matières comme les métaux, le verre, la faïence, le bois, à condition toutefois que leur surface soit lisse et propre. Par contre, les gouttes conservent à peu près la forme sphérique sur les feuilles tapissées de poils de certains végétaux comme le géranium, les capucines et la sauge, ainsi que sur les plumes

d'oiseaux.

Gouttes d'eau sur une plume de canard.

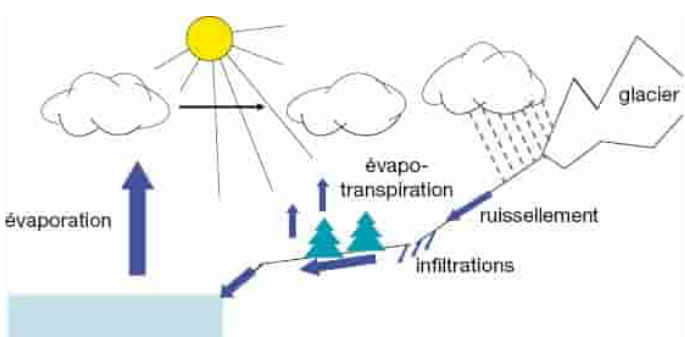
C'est l'affinité de l'eau pour les solides et sa tension superficielle élevée qui sont responsables de la *capillarité* qui fait monter l'eau spontanément dans les conduits de très petits diamètres. La capillarité intervient beaucoup dans la vie de tous les jours. C'est elle qui rend absorbants les corps poreux ou fibreux comme le papier et les éponges. Si on trempe l'extrémité d'un sucre dans une tasse de café, celui-ci monte et on obtient un « canard » qui fond dans la bouche. C'est aussi grâce à la capillarité que les bougies nous éclairent : l'allumette enflammée fait fondre la cire, qui monte par capillarité dans la mèche. La cire liquide se vaporise et sa vapeur brûle dans l'air en produisant de la lumière et de la chaleur qui entretient le processus. Nous verrons que la capillarité contribue à l'ascension de la sève des arbres (voir partie 5). La capillarité fait monter l'eau dans les murs des vieilles maisons, et elle joue un rôle important dans la formation des « cheminées de fées ». Ces étranges colonnes, appelées aussi « demoiselles coiffées », ont été sculptées par l'érosion dans des dépôts comportant des éléments très hétérogènes sur le plan granulométrique, par exemple des blocs rocheux et un mélange d'argile et de sable. Dans nos régions, on les observe principalement dans les versants des dépôts morainiques et fluvio-glaciaires.

Le site de « la salle du Bal des demoiselles coiffées » à Théus (Hautes-Alpes).

Le ruissellement de l'eau et l'érosion éolienne dégagent progressivement les plus gros blocs qui restent en place. Le bloc comprime le sédiment sur lequel il repose, ce qui le consolide. Il l'abrite aussi des précipitations, ce qui tend à l'*assécher*. L'eau piégée dans le sol peut alors remonter par capillarité. Cette eau est chargée en sels minéraux comme le carbonate de calcium, qui cristallisent en formant un « ciment » qui assure la cohésion du dépôt sous-jacent. C'est cette cohésion qui permet aux colonnes d'atteindre des hauteurs spectaculaires.

Comment fonctionne le cycle de l'eau ?

Sur Terre, la plus grande partie de l'eau (97,5 %) se trouve dans les océans et les lacs salés. Et ce sont les océans, qui couvrent 71 % de sa surface, qui donnent à notre planète sa couleur bleue vue de l'espace. Dans l'atmosphère, l'eau est présente sous ses trois états : de la vapeur en proportion variable mais inférieure à 4 %, et des gouttelettes liquides et des microcristaux de glace en suspension dans les nuages. L'atmosphère ne contient qu'une infime partie de l'eau présente sur Terre, environ 0,001 %, mais c'est elle qui permet le *recyclage permanent* de l'eau.



Le cycle de l'eau.

Le moteur de ce recyclage est l'*énergie solaire* qui fait évaporer l'eau des océans, des mers, des lacs, des cours d'eau et des zones humides. Cette énergie fait aussi croître les végétaux, qui puisent l'eau liquide dans le sol et rejettent de la vapeur d'eau dans l'atmosphère par *évapotranspiration*. Le temps de résidence de l'eau dans ses différents « réservoirs » est très variable : une molécule d'eau reste en moyenne 8 jours dans l'atmosphère, 17 ans dans les lacs et 2 500 ans dans les océans.

Les océans constituent un réservoir gigantesque, et seuls des phénomènes de très grande ampleur peuvent modifier son niveau. Au moment du pic de la dernière glaciation, il y a environ 18 000 ans, une quantité d'eau très importante était stockée sous forme de glace. Privés du retour de cette eau, les océans ont vu leur niveau baisser d'environ 120 m. Beaucoup plus loin dans le passé, le niveau des océans variait en fonction de la répartition des continents imposée par la tectonique des plaques : quand une masse continentale importante se trouvait au voisinage des pôles, beaucoup d'eau était séquestrée dans les glaces et le niveau des océans baissait. Quand les continents se concentraient vers l'équateur, les précipitations étaient fortes, les glaciers disparaissaient et le niveau remontait. Différents modèles indiquent que durant les derniers 500 millions d'années, le niveau de l'eau était en moyenne plus élevé qu'actuellement, d'environ 200 à 300 m.

Focus

L'élévation actuelle du niveau des océans

Au cours du XX^{e} siècle, le niveau moyen des océans s'est élevé de 17 cm, et il monte actuellement de 3 mm par an. Ce phénomène est dû à trois effets du réchauffement climatique dont les contributions sont à peu près égales : la fonte des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique, la fonte des glaciers de montagne et la dilatation de l'eau des océans.

L'eau liquide est-elle nécessaire à la vie ?

Chacun sait que l'être humain peut vivre assez longtemps sans se nourrir, mais qu'il ne survit que quelques jours s'il est privé d'eau. Le besoin d'eau est commun à tous les êtres vivants, qui se donnent parfois beaucoup de mal pour s'en procurer.

Vivre dans les zones arides

Les zones arides se caractérisent par de très faibles précipitations et une très forte évaporation. L'immense désert d'Atacama au Chili fait partie des régions les plus arides de la planète. Il est réputé pour la pureté de son air, et plusieurs observatoires astronomiques s'y sont installés. Il s'écoule parfois plusieurs dizaines d'années avant qu'il ne pleuve, et certains endroits n'ont pas reçu une goutte d'eau depuis des centaines d'années. Pourtant, une explosion de vie bactérienne a eu lieu en 2015 à la faveur d'un épisode pluvieux. La sécheresse est revenue les années suivantes, et les bactéries ont repris des formes « dormantes » résistantes à la dessiccation, à la chaleur et au rayonnement UV. Les dunes du Sahara sont peuplées de micro-organismes qui restent à l'état « dormant » dans la journée, et qui se reproduisent pendant les brefs moments où la rosée se condense, juste avant le lever du soleil.

Dans les régions arides, les végétaux ont développé des stratégies particulières pour satisfaire leurs besoins en eau. Les tissus des plantes « succulentes » sont capables de stocker l'eau. Leurs tiges et leurs feuilles charnues leur valent d'être qualifiées de « plantes grasses ». Les cactées captent les gouttes de rosée avec le « filet » constitué de leurs aiguillons, de leurs poils et de leur « laine », et leur racine s'enfonce profondément dans le sol pour trouver un peu d'humidité.

Le figuier de Barbarie.

Cette cactée originaire du Mexique s'est bien adaptée aux régions méditerranéennes.
Le fruit et la tige en forme de raquette, la cladode, sont comestibles.

Chez d'autres plantes, les parties aériennes sont réduites, les feuilles sont petites, et leur épaisse cuticule est couverte de cire protectrice pour limiter l'évaporation. Elles sont souvent repliées, parfois même disparaissent, laissant à la tige le soin de capter la lumière. À la partie inférieure des feuilles, les stomates, où ont lieu les échanges de gaz impliqués dans la photosynthèse, sont en nombre réduit, et leur ouverture est régulée de façon à limiter la perte en vapeur d'eau.

Les animaux aussi possèdent des adaptations particulières. Les scorpions et les insectes, protégés par une épaisse couche de chitine, se réfugient sous terre dans la journée. Pour limiter les pertes d'eau, les glandes sudoripares travaillent peu, les déjections sont quasi sèches et l'urine très concentrée. La recherche d'eau et de nourriture a lieu la nuit. L'emblème de cette faune est un petit renard à la robe claire, le fennec, qui est présent dans tout le Sahara.

© Getty Images

Le fennec (*Vulpes zerda*).

Ses oreilles particulièrement développées favorisent le refroidissement du sang et lui permettent de détecter ses proies la nuit.

Vivre dans la neige ?

En montagne, on voit parfois en été des taches diffuses de couleur rose sur les névés.

Colonies d'algues microscopiques *Chlamydomonas nivalis*.

La photo a été prise à 2 100 m d'altitude, en juillet.

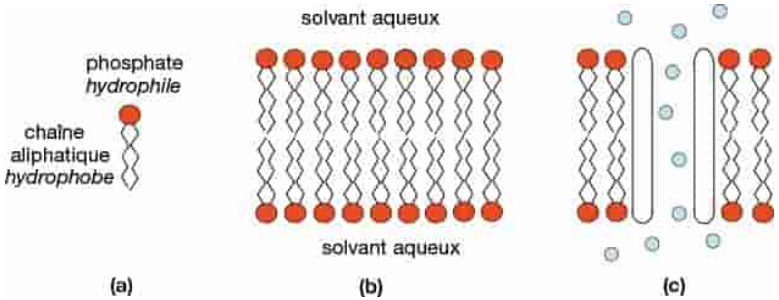
Si on prend un peu de neige dans la main, on constate que ce qui est coloré est impalpable : ce sont des colonies d'algues microscopiques nommées *Chlamydomonas nivalis*. Grâce à leurs pigments rouges, elles absorbent un peu le rayonnement solaire, et le faible réchauffement qui en résulte suffit pour faire fondre la mince pellicule de neige qui les entoure : elles vivent dans l'eau *liquide*. En hiver, elles se transforment en spores résistantes.

On comprend aisément pourquoi les êtres vivants font tout pour se procurer de l'eau quand on sait que leurs cellules sont faites en moyenne de 80 % d'eau. Le corps d'un embryon d'être humain contient 95 % d'eau. Le pourcentage tombe à 75 % chez l'adulte, avec des variations très importantes selon les organes : 1 % dans l'ivoire des dents, 22 % dans les os, 75 % dans le cerveau, 76 % dans les muscles et 83 % dans le sang. Chez les végétaux, le pourcentage varie entre 80 et 95 %. Mais à quoi sert toute cette eau ?

Le rôle de l'eau dans les processus biologiques

Quelques exemples suffisent à montrer le rôle essentiel de l'eau dans les cellules.

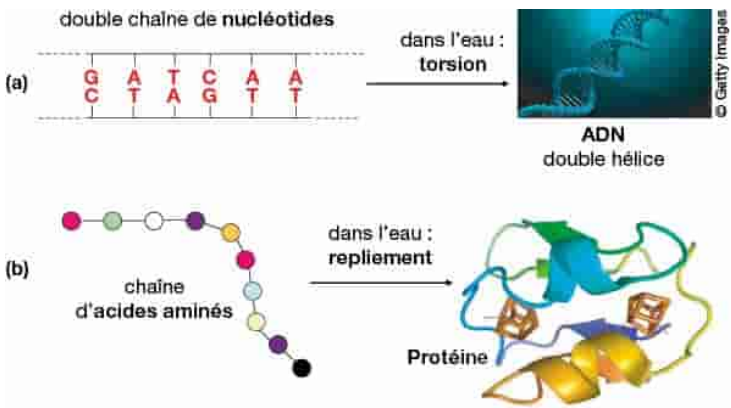
- Le fonctionnement des êtres vivants nécessite une *compartimentation* qui permet aux processus qui ont lieu à l'intérieur des cellules de ne pas interférer avec le milieu extérieur. Celle-ci est assurée par une *membrane* constituée d'une bicouche de lipides. Chez les organismes eucaryotes (animaux, plantes, champignons), ce sont des phospholipides (figure a page suivante). En présence d'eau, ces phospholipides s'organisent spontanément en une bicouche dans laquelle les groupes phosphates hydrophiles sont exposés au solvant, et les chaînes aliphatiques hydrophobes pointent vers l'intérieur (figure b). Ces membranes sont imperméables à la plupart des substances, mais des protéines qui y sont insérées constituent des « canaux » ou des « pompes » qui permettent d'échanger de façon sélective certaines molécules avec le milieu extérieur. Les canaux spécialisés dans le transport des molécules d'eau sont les *aquaporines* (figure c) qui jouent un rôle essentiel dans les phénomènes osmotiques.



Coupe schématique d'une membrane constituée d'une bicouche de phospholipides.

(a) Un phospholipide comporte une « tête » phosphate polaire et une chaîne aliphatique hydrophobe.
(b) Dans l'eau, les phospholipides forment une double couche où les têtes polaires sont exposées au solvant, et les chaînes aliphatiques pointent vers l'intérieur.
(c) Des canaux appelés « aquaporines » permettent aux molécules d'eau d'entrer et de sortir.

• À l'intérieur des cellules, les molécules d'eau interagissent de façon spécifique avec les différents constituants des macromolécules biologiques. Ce sont ces interactions qui induisent, par exemple, le *repliement* des chaînes de nucléotides et d'acides aminés, ce qui leur permet d'adopter la conformation dans laquelle elles sont fonctionnelles.



L'eau participe à la structuration des macromolécules biologiques.

(a) Torsion d'un double brin de nucléotides.
(b) Repliement d'une chaîne d'acides aminés.

• Grâce au caractère polaire marqué de la molécule H_2O, l'eau liquide se structure spontanément autour des ions, ce qui favorise leur dissolution. Dans les cristaux de chlorure de sodium, par exemple, les ions Na^+ et Cl^- sont liés par de fortes interactions électrostatiques. Quand ces cristaux sont au contact de l'eau, les ions à la surface interagissent avec les molécules H_2O, qui s'orientent de telle manière que les sites oxygène chargés négativement (figure b du haut page 66) pointent vers les ions Na^+, tandis que les sites hydrogène chargés

positivement pointent vers les ions Cl^-. Ces interactions provoquent la séparation des ions Na^+ et Cl^-, et chacun s'entoure de six molécules d'eau : le sel se dissout dans l'eau. De façon générale, l'eau est un excellent solvant pour de très nombreuses molécules qui peuvent ainsi se rencontrer et réagir chimiquement. La molécule H_2O intervient elle-même dans de nombreuses réactions qui ont lieu dans les cellules. Sa dissociation produit les ions OH^- et H^+. Ces derniers se fixent généralement sur une autre molécule d'eau pour former l'ion H_3O^+. La concentration des ions H_3O^+ dans l'eau détermine son *acidité*. On la quantifie par un paramètre, le pH, qui joue un rôle essentiel dans la plupart des processus biologiques.

Grâce à une eau liquide abondante sur Terre, la vie est apparue, s'est développée et s'est diversifiée. Nous ne pouvons pas imaginer actuellement d'autres formes de vie, et la recherche de vie extraterrestre commence par la quête d'eau liquide (voir partie 5).

Complément

www.lienmini.fr/39798-cpltsP77

L'eau liquide, référence de masse et de densité

La pression de l'eau

Je repris des respirations normales, lentes, j'inclinai la tête et nageai doucement jusqu'à 10 mètres. À cette profondeur, la pression de l'eau est deux fois celle qui règne à la surface et pourtant je ne la ressentais pas. C'est que je respirais un air dont la pression était exactement celle de l'eau ambiante ; et dans mes poumons, cette contre-pression était communiquée au sang et instantanément répandue à travers tout mon corps […]. Regardant au-dessus de moi, je vis la surface qui brillait comme un mauvais miroir, avec dans son centre la silhouette nette de Simone réduite à la taille d'une poupée. Je fis un signe et la poupée me répondit.

Jacques-Yves Cousteau, Le Monde du silence

Qu'est-ce que la pression ?

Nous sommes dans les Alpes, en hiver. Il est tombé 50 cm de neige pendant la nuit et je pars de bon matin en balade. Si je pars à pied, mon poids me fera enfoncer dans la neige fraîche. Je vais me fatiguer rapidement et me tremper les pieds. Si je chausse des raquettes à neige ou des skis, mon poids se répartira sur une surface plus grande et je m'enfoncerai beaucoup moins. Inversement, pour enfoncer ou trancher un objet, la surface de contact doit être la plus petite possible : on choisit des clous pointus pour assembler deux planches, et un couteau bien aiguisé pour découper proprement un gigot. L'enfoncement est déterminé par la *pression*, égale au poids ou une autre force, divisé par la surface sur laquelle il s'exerce : $p = P/S$

L'unité de pression est le pascal (abréviation : Pa). C'est une pression très faible, à peu près égale à celle qu'exerce le poids d'une masse de 100 g répartie sur 1 m^2. On utilise souvent un multiple, le bar, égal à 10^5 Pa. Le millibar (mbar) est donc égal à 100 Pa (un hectopascal).

La pression et ses unités.

Focus

Exemples de pressions

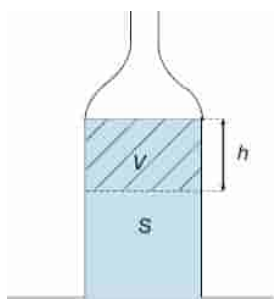
D'après le complément sur l'eau liquide page 82, le poids d'un corps de masse 1 kg est égal à 9,81 N. S'il est réparti sur 1 m^2, il exerce une pression de 9,8 Pa. S'il est réparti sur 1 cm^2, il exerce une pression de $9{,}8 \times 10^4$ Pa = 0,98 bar.

Le poids d'un randonneur de 60 kg est égal à 590 N, et la surface de la semelle d'une chaussure de pointure 40 est égale à 300 cm^2 environ. Si tout le poids du corps repose sur les deux chaussures, il exerce une pression égale à $590 / (600\ 10^{-4}) = 10\,000$ Pa = 0,1 bar. Avec des raquettes à neige d'une surface de 1 200 cm^2 environ, la pression est divisée par 4.

Pourquoi la pression de l'eau augmente-t-elle avec la profondeur ?

Dans une bouteille d'eau, les molécules situées à la profondeur h subissent la pression due au poids de l'eau qui les surmonte (figure page suivante). Ce poids P est égal à ρVg, où V est le volume d'eau, égal au produit de la hauteur h par la surface S de la section de la bouteille. Cette eau étant répartie sur toute la section de la bouteille, son poids crée la *pression* $p = P / S$. Si on remplace P par son expression, la surface S se simplifie et il reste :

$$p = \rho\, g\, h$$



Pression créée par le poids de l'eau dans une bouteille.

Le poids de l'eau qui occupe le volume hachuré V est $P = \rho gV$, où ρ est la masse volumique de l'eau et g l'accélération de la pesanteur. Puisque $V = S\,h$, où S est la surface de la section de la bouteille, la pression créée par le poids de l'eau à la profondeur h est $p = P/S = \rho\, g\, h$.

La pression due au poids de l'eau est proportionnelle à la profondeur. La masse volumique de l'eau étant égale à 1 000 kg/m^3, la

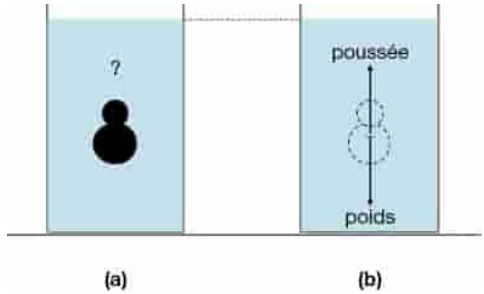
pression est par exemple égale à 980 Pa à 10 cm de profondeur.

Dans l'eau, comme dans tous les liquides, la pression s'exerce *dans toutes les directions*, en particulier sur la paroi de la bouteille : si on perce un trou dans celle d'une bouteille en plastique, l'eau sort horizontalement avec une vitesse d'autant plus grande que la pression est grande. On montre que cette vitesse v est telle que $v^2 = 2gh$. Pour une profondeur de 10 cm, on obtient $v = 1{,}4\ \text{m s}^{-1}$. On peut se demander à quelle hauteur il faut percer le trou pour que le jet tombe *le plus loin* possible. La réponse n'est pas évidente : si le trou est très bas, la vitesse du jet est grande, mais la chute est brève. Inversement, si le trou est haut, la vitesse est faible, mais la chute dure longtemps. Un petit calcul fait au premier complément page 98 montre que la portée du jet est maximale lorsque le trou est percé *à mi-hauteur*. On le vérifie facilement en perçant des trous à différentes hauteurs et en les bouchant avec du ruban adhésif. La portée initiale du jet est inférieure à celle que prévoit le calcul à cause de la viscosité de l'eau et de la résistance de l'air.

Qu'est-ce que la poussée d'Archimède ?

Que se passe-t-il quand on immerge un objet solide dans un récipient rempli d'eau (figure a ci-dessous) ? Va-t-il descendre, flotter entre deux eaux ou monter ? Au troisième siècle avant J.-C., Archimède, le plus grand savant de l'Antiquité, donna la bonne réponse sous forme de « principes » déduits de ses observations. En 1586, le jeune Galilée réexamina la question. Il pensait qu'un objet immergé dans l'eau subissait une « diminution de poids », et il faisait observer que si cet objet était constitué d'eau, il serait en équilibre puisque cette eau ne bougerait pas. Il en déduisait que la « diminution de poids » de l'objet était égale au poids du volume d'eau qu'il occupait.

Nous savons maintenant que le poids d'un objet est dû à l'attraction de la Terre et que celle-ci ne change pas quand l'objet est dans l'eau. L'allègement apparent d'un objet immergé est dû aux *forces de pression* exercées par l'eau. Reprenons le raisonnement de Galilée en introduisant la notion de pression : on enlève l'objet et on ajoute de l'eau de façon à retrouver le niveau initial (figure b).



La poussée d'Archimède.

Un objet est immergé dans l'eau. L'ensemble des forces de pression qu'il subit est équivalent à une force dirigée vers le haut, égale au poids du volume d'eau qu'il occupe : la *poussée*.

Le volume occupé auparavant par l'objet, représenté en tirets, est maintenant rempli d'eau. Ce volume ayant la même forme et étant situé à la même profondeur que l'objet de la figure a, il est soumis aux mêmes forces de pression. Ce volume d'eau est *en équilibre*, ce qui implique que les forces de pression sont exactement compensées par son poids. On en déduit que les forces de pression sont équivalentes à une force dirigée *vers le haut*, égale au poids du volume d'eau occupé par l'objet. C'est ce qu'on appelle la *poussée* d'Archimède. Revenons alors à la figure a. L'objet est soumis à son poids et à la poussée d'Archimède. Si l'objet est fait d'une matière *homogène*, le rapport de son poids et de la poussée est égal au rapport de sa masse volumique et de celle de l'eau, c'est-à-dire à la *densité* de la matière dont est fait l'objet (voir complément page 82). Si celle-ci est supérieure à 1, le poids l'emporte et l'objet coule. C'est le cas d'un morceau de fer. Dans le cas contraire, il monte à la surface et il flotte. C'est ce qui se passe avec un morceau de bois ou de glace.

Présentée de cette manière, la poussée d'Archimède paraît un peu abstraite. Et pourtant, il est facile de la *ressentir*. Si on pose une boîte de conserve vide sur l'eau, elle flotte. Mais si on appuie sur le fond pour la faire couler, on *sent* très bien la résistance due à la poussée d'Archimède, qui augmente quand on enfonce la boîte.

La poussée d'Archimède facilite beaucoup le déplacement des objets dans l'eau et sur l'eau. Pour tracter une lourde charge qui flotte sur l'eau, il suffit de vaincre les frottements de l'eau contre la partie immergée. On est toujours étonné de voir de petits remorqueurs tirer d'énormes navires, et un cheval tracter une péniche sur un chemin de halage.

© Photos Getty Images

Différents modes de tractage.

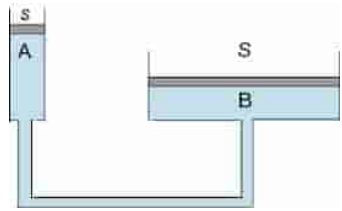
Quand dit-on qu'un liquide est incompressible ?

Dans tout ce qui précède, nous avons supposé implicitement que la masse volumique de l'eau ne dépendait pas de la pression. C'est le cas dans les conditions habituelles, et on dit que l'eau est *incompressible*. Dans un liquide incompressible, la variation de pression d'un niveau fait varier la pression d'un autre niveau de la même quantité : les liquides incompressibles transmettent intégralement les variations de pression.

Cette propriété est exploitée dans les freins des véhicules : quand le conducteur appuie sur la pédale de frein, il comprime le liquide contenu dans le « maître-cylindre ». Cette compression est transmise à des pistons qui poussent les plaquettes contre un disque solidaire de la roue. Le frottement du disque sur les plaquettes convertit une partie de l'énergie cinétique du véhicule en chaleur. Des purgeurs évacuent en permanence l'air éventuellement présent dans les canalisations. Le liquide s'échauffe beaucoup lors du freinage et sa température peut dépasser 100 °C. On utilise des liquides de synthèse dont la température d'ébullition est élevée, même en présence de trace d'eau.

Le vérin et la presse hydraulique

Les liquides incompressibles sont aussi utilisés dans les vérins et les presses hydrauliques, dont le fonctionnement est schématisé ci-dessous.

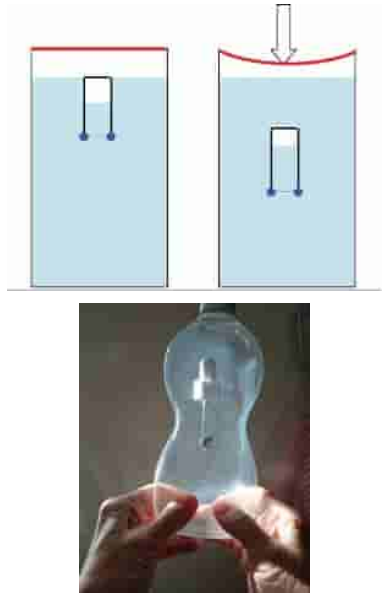


Principe du vérin et de la presse hydraulique.

Initialement, les pressions dues aux poids respectifs des pistons ne sont pas égales et ceux-ci ne sont pas au même niveau. Si on applique une force *f* sur le petit piston de surface *s*, la pression augmente de *f* /*s* en A et en B. Pour compenser cette augmentation de pression, il faut exercer sur le piston B une force $F = (S/s)\,f$. Si le rapport *S*/*s* est grand, on peut soulever des objets très lourds en B en appliquant une force modérée sur le petit piston. Mais quand on enfonce ce piston de *d*, le piston B ne s'élève que de $(s/S)\,d$. Les liquides utilisés doivent supporter des pressions de plusieurs centaines de bars tout en assurant la lubrification des pistons. Les vérins hydrauliques permettent de soulever des objets très lourds avec précision. Ils équipent les engins agricoles et on les utilise dans les travaux publics et l'industrie. Il existe aussi des vérins *pneumatiques*, dans lesquels la pression est transmise par de l'*air comprimé*. Ils travaillent avec des pressions plus faibles et sont moins précis à cause de la compressibilité de l'air. On les utilise, par exemple, pour effectuer des opérations de manutention et pour ouvrir et fermer les portails et les portes de garage. Les presses hydrauliques sont très utilisées dans l'industrie pour presser les objets, les écraser ou les mouler.

La vie du ludion : des hauts et des bas

Il semble que le ludion ait été inventé par Raffaello Magiotti, un disciple de Galilée. C'est un petit tube fermé à une extrémité, lesté de telle manière qu'il affleure à la surface d'un récipient rempli d'eau.



Principe du ludion et sa réalisation avec un compte-gouttes lesté.

Son poids est alors équilibré par la poussée d'Archimède due au petit volume d'air qui n'est pas occupé par l'eau. Le récipient est fermé par une membrane souple. Quand on appuie sur la membrane, l'air au-dessus de l'eau est comprimé et la surpression est transmise en partie au liquide. L'eau monte à l'intérieur du ludion et comprime l'air qu'il contient. Le volume occupé par l'air diminue, et la poussée d'Archimède également : le ludion descend. Le phénomène est réversible : si on relâche la membrane, le ludion remonte.

On peut facilement réaliser soi-même un ludion. On peut utiliser une bouteille en plastique remplie à ras bord et fermée par un bouchon, et la comprimer pour augmenter la pression. Le fonctionnement du ludion repose sur la transmission des variations de pression dans l'eau et sur la variation de la poussée d'Archimède.

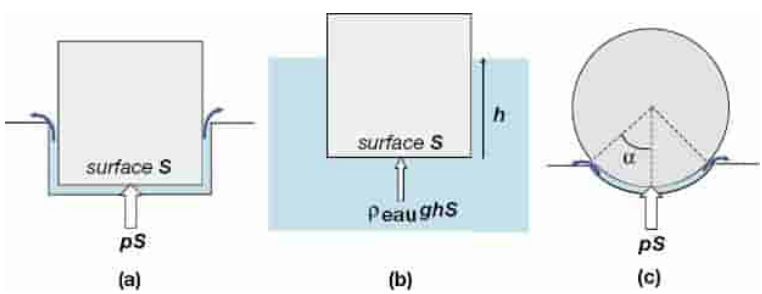
Comment fonctionnent les fontaines-boules ?

Les « fontaines-boules » sont des objets décoratifs et ludiques que l'on peut voir dans les parcs de certaines villes ou villages. Une grosse boule, souvent en granit, est en sustentation sur un mince film d'eau qui s'écoule à sa périphérie, et on est étonné de la faire tourner facilement en dépit de sa grande masse.

La fontaine-boule de La Roche-des-Arnauds (Hautes-Alpes).

La boule est en agate, une variété rubanée de quartz.

Nous allons voir qu'une faible pression suffit à assurer sa sustentation. Examinons d'abord le cas plus simple d'un cube de granit placé dans les mêmes conditions (figure a page suivante). L'équilibre est obtenu quand la résultante des composantes verticales des forces de pression est égale au poids du cube. La masse d'un cube de granit d'arête 80 cm et de densité 3 est égale à 1 536 kg, et son poids est $P = 15\,070$ N. Pour l'équilibrer, il faut exercer sur la surface S la pression $p = P/S = 0{,}24$ bar. Cette pression est très inférieure à celle de l'eau du robinet. Pourquoi ce cube coule-t-il si on le pose sur l'eau d'un bassin ? La situation est représentée sur la figure b, où h est la hauteur de la partie immergée. La pression qui s'exerce sur la surface S est maintenant $\rho_{eau}gh$. Elle est maximale quand le cube est complètement immergé et vaut alors 0,078 bar, une valeur trois fois plus petite que la pression nécessaire pour équilibrer le poids. Le calcul est moins simple dans le cas d'une boule, car les forces de pression s'exercent sur une surface sphérique et la pression de sustentation dépend de l'angle α (figure c). Avec la même masse que précédemment, on obtient par exemple $p = 0{,}39$ bar pour $\alpha = 45°$.



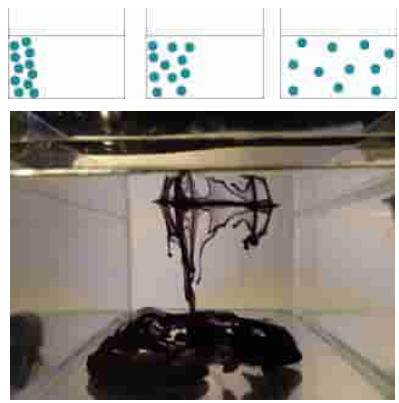
Comment faire flotter un cube ou une boule de granite sur l'eau. Les flèches blanches représentent les composantes verticales des forces de pression.

Qu'appelle-t-on la « pression osmotique » ?

La diffusion des molécules

Quand on est invité chez des amis et qu'on s'approche de la cuisine, il est facile de deviner si du poisson est au menu. Bien au chaud dans le four, le poisson émet des molécules que notre nez, associé à notre cerveau, reconnaît. Des molécules s'échappent du four et occupent rapidement tout l'espace disponible. Si on oublie de fermer la porte de la cuisine, toute la maison sentira bientôt le poisson.

Passons aux liquides. Les sirops contiennent des colorants. Si on en verse quelques gouttes dans un verre d'eau, les molécules de colorant diffusent comme celles des gaz, mais beaucoup plus lentement, car elles subissent les collisions des molécules d'eau. Si la densité du sirop est la même que celle de l'eau, la diffusion tend à uniformiser la couleur de la solution (figure page suivante).



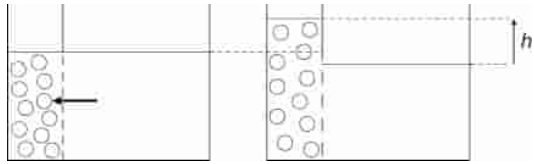
La diffusion.

À gauche : la solution évolue vers un état où la concentration des molécules de colorant est uniforme et ne varie plus. À droite : la diffusion d'une goutte d'encre posée à la surface de l'eau crée des motifs imprévisibles.

La *diffusion* est la tendance des molécules à se déplacer spontanément vers les zones de concentration plus faible. Cette tendance n'a rien de mystérieux : c'est la conséquence de la *mobilité* des molécules et de leurs *collisions aléatoires* qui les font progresser dans la direction où elles rencontrent le moins d'obstacles. Si elles sont initialement concentrées à gauche du récipient, les chocs contre la paroi les déplacent vers la droite. Celles qui vont dans cette direction ne rencontrent que des molécules d'eau, alors que celles qui reviennent en arrière rencontrent aussi des molécules de colorant. La solution évolue donc *spontanément* vers une situation où la concentration est partout la même et n'évolue plus, même si les molécules du colorant continuent à se déplacer au hasard.

L'osmose

Imaginons maintenant l'expérience représentée ci-dessous, figure de gauche.



L'osmose.

À cause de la présence de *macromolécules* (ronds blancs) dans le compartiment de gauche, la concentration de l'eau y est inférieure à celle du compartiment de droite. L'eau diffuse de la droite vers la gauche : c'est l'*osmose*.

Le compartiment de gauche contient une solution aqueuse de macromolécules, celui de droite de l'eau pure. Les compartiments sont séparés par une membrane dite *semi-perméable*, qui laisse passer les molécules d'eau mais pas les macromolécules. Initialement, le niveau de l'eau est le même dans les deux compartiments. Que va-t-il se passer ? Dans le compartiment de gauche, les macromolécules occupent une partie du volume. La concentration des molécules d'eau y est donc plus faible que dans le compartiment de droite, où l'eau est pure. Cette différence de concentration fait diffuser l'eau de la droite vers la gauche à travers la membrane. C'est le phénomène d'*osmose*. Le niveau de l'eau monte à gauche et descend à droite. La diffusion ne peut pas durer indéfiniment car l'ascension de l'eau dans le compartiment de gauche crée une surpression qui s'y oppose. La diffusion s'arrête quand la différence de niveau est tel que la surpression équilibre la tendance à diffuser (figure de droite). On peut donc mesurer cette tendance par la quantité ρgh à l'équilibre. Elle est homogène à une pression et on l'appelle la *pression osmotique*. Elle est proportionnelle à la concentration des macromolécules.

Les cellules des êtres vivants sont entourées d'une membrane semi-perméable : les macromolécules qu'elles contiennent ne peuvent pas la traverser, mais l'eau le peut grâce à des canaux spécifiques (figure c, haut de la page 80). L'eau entre ou sort par osmose en fonction des caractéristiques du milieu dans lequel baignent les cellules. Examinons par exemple le cas des poissons d'eau douce. La concentration des solutés dans leurs cellules étant beaucoup plus grande que dans l'eau où ils évoluent, l'eau entre par osmose dans les cellules exposées à l'eau, ce qui pourrait les faire éclater. Ces poissons boivent donc peu et ils excrètent beaucoup d'urine diluée. La situation est inversée pour les poissons de mer : la concentration en chlorure de sodium étant beaucoup plus grande que celle des solutés de leurs cellules, celles-ci perdent beaucoup d'eau par osmose et tendent à se déshydrater. Pour

compenser ces pertes, ces poissons avalent beaucoup d'eau salée, leurs reins filtrent l'eau pure et éliminent le sel dans l'urine très concentrée. Les poissons qui vivent tantôt en rivière, tantôt en mer, comme les saumons, sont capables de s'adapter pour faire fonctionner l'un ou l'autre de ces systèmes.

La membrane cellulaire des plantes, des algues et des champignons est doublée d'une enveloppe à base de cellulose qui lui permet de résister à des pressions osmotiques très élevées. Quand on arrose des fleurs desséchées, l'eau pénètre par osmose dans les cellules déshydratées. Celles-ci gonflent, ce qui accroît la rigidité de la tige et des feuilles. La plante se redresse, la photosynthèse redémarre, des molécules de chlorophylle sont à nouveau synthétisées, et la plante reverdit.

Jambon cru et confitures

Les phénomènes osmotiques interviennent beaucoup dans la cuisine : si les concombres deviennent craquants quand on les saupoudre de sel, c'est parce que la pression osmotique fait sortir l'eau de leurs cellules. Pour éviter la dégradation de la matière organique par les micro-organismes, on pratique depuis très longtemps la salaison des viandes et des poissons, laquelle tue les micro-organismes en les déshydratant. Pour conserver les fruits, on se sert du sucre. La paroi des cellules végétales contient une molécule magique : la pectine. Quand on cuit des fruits coupés en morceaux dans une solution sucrée, l'eau sort des cellules par osmose et la pectine est extraite des parois. En milieu légèrement acide, les molécules de pectine s'associent et forment un gel : la confiture « prend ».

Photo 1 Jean-Paul Louvigné

Deux exemples d'utilisation des phénomènes osmotiques dans la cuisine.

Peut-on vivre sous pression ?

Le poids de l'air crée la *pression atmosphérique* dont nous reparlerons en détail dans la partie 3. Sa valeur moyenne au niveau de la mer est égale à 1 013 hPa, environ un bar. C'est à peu près la pression produite par le poids d'une colonne d'eau de 10 mètres de haut, égale à 980 hPa. À 10 mètres de profondeur, la pression est donc deux fois plus grande que la pression atmosphérique, et elle augmente de 1 bar tous les 10 mètres. Cette surpression a des conséquences sur la physiologie des êtres vivants, et ceux-ci s'y sont adaptés de différentes manières.

La plongée sous-marine

Pour respirer, nous inspirons de l'air dans nos poumons. Là, l'oxygène passe dans le sang qui le distribue aux cellules de notre corps. Si on inspire l'air et qu'on plonge en apnée en fermant la bouche et en se pinçant le nez, l'oxygène des poumons est consommé rapidement et on ne peut pas rester longtemps sous l'eau. En s'entraînant pour économiser l'oxygène, les plongeurs en apnée parviennent à atteindre de grandes profondeurs et à remonter. Mais dans les cavités de leur corps, comme les poumons et l'oreille interne, la pression est celle de l'air qu'ils respirent habituellement, c'est-à-dire la pression atmosphérique. Elle est beaucoup plus faible que la pression de l'eau à grande profondeur. Ces cavités sont fortement comprimées, ce qui occasionne des douleurs au niveau du thorax et des tympans.

Le scaphandrier « à casque » évite ces problèmes : sa tête et son thorax sont protégés par un casque métallique équipé de hublots, qui se prolonge par une combinaison étanche pour éviter les pertes de chaleur. L'air qu'il respire arrive par un tube flexible relié en surface à

une pompe, et sa pression est ajustée à celle de l'eau à la profondeur où il travaille. La pompe – de nos jours, un compresseur – était jadis une simple pompe à bras manœuvrée par deux personnes. Les jeunes de 7 à 77 ans penseront aux deux Dupond chargés d'envoyer de l'air à Tintin qui se promène au fond de la mer en scaphandre, et qui s'arrêtent de pomper parce qu'ils sont un peu fatigués ! Le scaphandrier manœuvre régulièrement une soupape qui laisse échapper un peu d'air du casque. Mais lors de la remontée, il doit s'arrêter pour effectuer des « paliers de décompression ». En effet, ses poumons ont été soumis pendant la plongée à une pression très élevée, et une grande quantité d'azote s'est dissoute dans le sang. Quand le scaphandrier remonte, il inspire de l'air dont la pression diminue. Si la diminution est trop rapide, l'azote dissous se dégage et forme des bulles qui perturbent la circulation sanguine. Pour l'éviter, il doit s'arrêter régulièrement pour laisser à l'azote dissous le temps de s'évacuer vers les poumons. Les paliers durent d'autant plus longtemps que la plongée a été longue et profonde. Les scaphandriers à casque effectuaient autrefois des réparations et des opérations de maintenance au fond de l'eau. Pour des questions de sécurité, ils sont de plus en plus remplacés par des robots pilotés depuis la surface.

© Adobe Stock

Le scaphandrier à casque.

Les scaphandriers à casque se déplaçaient avec difficulté en tirant avec eux le « cordon ombilical » qui les alimentait en air. Les plongeurs d'aujourd'hui ont sur leur dos des « tubes » qui contiennent un mélange d'oxygène et d'un autre gaz, généralement de l'azote. Un petit appareil, le « scaphandre autonome », régule la pression du mélange que respire le plongeur, qui est constamment égale à la pression de l'eau, quelle que soit la profondeur. Cet appareil, qui a révolutionné la plongée sous-marine, a été conçu et mis au point en 1943 à Bandol, par Émile Gagnan et Jacques-Yves Cousteau. Bien entendu, ces plongeurs doivent eux aussi respecter des paliers de

décompression.

Mais aussi…

Le professeur Tournesol

Ce personnage a été inspiré à Hergé par le physicien suisse Auguste Piccard qui a conçu le bathyscaphe, le premier engin de plongée profonde. En 1954, il est descendu à 4 050 mètres de profondeur. Les records se sont succédé jusqu'en 1960, où un nouveau bathyscaphe, *le Trieste*, s'est posé au fond de la fosse des Mariannes à 10 916 mètres de profondeur. Un des deux pilotes était Jacques Piccard, le fils d'Auguste. Bertrand Picard, petit-fils d'Auguste, est bien connu pour son engagement pour la transition écologique.

Comment les mammifères marins, les poissons et les amphibiens respirent-ils ?

Après la disparition des dinosaures, les mammifères se sont beaucoup diversifiés. Certaines espèces sont même retournées à la vie aquatique il y a environ 50 millions d'années. Les phoques, les dauphins et les baleines respirent en surface avec des poumons, comme nous, et ils ont les mêmes problèmes que les plongeurs en apnée. Mais certaines adaptations leur permettent d'effectuer des plongées profondes de longues durées. Dans nos poumons, les échanges de gaz entre l'air et le sang sont loin d'être complets : l'air que nous inspirons contient 21 % d'oxygène et il en reste encore 16 % dans celui que nous expirons. Les mammifères marins ont des poumons relativement petits, ce qui leur permet de plonger à de grandes profondeurs, et ils sont bien plus performants que les nôtres. Chez les dauphins par exemple, 80 à 90 % de l'air est renouvelé à chaque inspiration. Leurs alvéoles pulmonaires sont plus efficaces que les nôtres, et leurs cellules musculaires possèdent beaucoup plus de myoglobines, les protéines spécialisées dans le transport et le stockage de l'oxygène.

Phoque veau marin de l'île de Skye (Écosse).

Les poissons, qui sont apparus au début de l'ère primaire il y a environ 500 millions d'années, n'ont pas ces problèmes : ils sont parfaitement adaptés à la vie sous-marine. Ils respirent l'oxygène dissous dans l'eau grâce à des branchies, et leur corps, fait essentiellement de muscles, possède peu de cavités, à l'exception d'une *vessie natatoire*. C'est un sac qui contient un mélange d'azote et d'oxygène, qui communique avec la bouche. Le poisson peut monter ou descendre en la gonflant plus ou moins : si la vessie est gonflée de telle manière que le poids du poisson est égal à la poussée d'Archimède, le poisson est en équilibre entre deux eaux. S'il gonfle davantage sa vessie, son poids ne change pas mais son *volume* augmente : la poussée d'Archimède, égale au poids de l'eau déplacée, augmente et le poisson monte. C'est l'inverse qui se produit s'il comprime sa vessie. Le poisson est un « ludion actif ». Signalons que les requins ne possèdent pas de vessie natatoire : ils doivent nager constamment pour ne pas couler.

© Adobe Stock

Truite fario.

Les amphibiens pratiquent les deux types de respiration au cours de

leur vie : les larves vivent dans l'eau et utilisent des branchies, et les adultes respirent l'oxygène de l'air avec des poumons et parfois leur peau.

Quelques amphibiens : grenouilles rousse, triton alpestre…

… et couple de crapauds communs.

Compléments

www.lienmini.fr/39798-cpltsP94

Portée du jet qui sort d'une bouteille percée
Osmose inverse et dessalement de l'eau de mer

Les déformations de l'eau

Certains jours, le noroît remplissait la baie d'un flot vert et noirâtre qui couvrait la plage de vase, de coquillages et de méduses, et venait menacer les cabines. Puis la mer sombre et houleuse se couvrait d'écume jusqu'à l'horizon. De grandes et fortes lames avançaient dans un calme inexorable et terrifiant, se recourbaient majestueusement en formant une voûte vert sombre au luisant de métal et déferlaient sur le sable dans le fracas, les sifflements, les craquements et les tonnerres…

Thomas Mann, Les Buddenbrook

Comment le son peut-il se propager dans l'eau ?

Les ondes sonores

Les sons sont des ébranlements de l'air générés par les vibrations rapides de certains objets ou par la percussion d'un objet sur un autre. Examinons, par exemple, ce qui se passe quand nous écoutons la musique qui vient d'un haut-parleur. Les haut-parleurs convertissent la variation d'un courant électrique en *vibrations* d'une membrane.

La figure de la page suivante montre le fonctionnement du modèle le plus répandu. Les vibrations de la membrane, que l'on sent en l'effleurant du doigt, produisent une succession rapide de compressions et de détentes de la couche d'air à son contact. L'air étant élastique, ces variations de pression se transmettent de proche en proche et font osciller les tranches d'air : une onde sonore se propage.

Le haut-parleur électrodynamique.

La partie mobile est en rouge. L'interaction entre le courant qui circule dans la bobine et le champ magnétique de l'aimant fait mouvoir la bobine qui se déplace en suivant les variations du courant. On voit sur la photo la membrane et le dos cylindrique de l'aimant.

Les oscillations ont lieu dans la direction de propagation et on dit que l'onde est *longitudinale*. En arrivant à nos oreilles, elles font vibrer le tympan et cette vibration est transformée en sensation sonore par l'oreille interne et le cerveau.

Pour étudier les variations de pression produites par une onde sonore, on effectue l'opération inverse : on les capte avec un micro qui les transforme en variations de courant que l'on peut visualiser. Les sons que nous qualifions de musicaux sont faits d'une succession de motifs *périodiques* de *période T* (figure a page 102). L'inverse de la période, qui est le nombre de motifs par seconde, est la *fréquence*. Son unité est le hertz (Hz) de dimension (seconde)$^{-1}$ (voir l'Appendice page 334). Nous percevons la *fréquence* d'un son périodique comme sa *hauteur*, et la forme du motif détermine le *timbre*. En principe, une oreille jeune perçoit les sons de fréquence comprise entre 20 Hz, des sons très graves, et 20 000 Hz, des sons hyperaigus. Le son ne se propage pas instantanément : quand on voit quelqu'un frapper au loin sur un piquet, le bruit arrive après un petit décalage. La vitesse de propagation du son, sa *célérité*, ne dépend pas de la fréquence. En effet, les instruments de musique émettent des sons de fréquence variable. Si ces sons se propageaient à des vitesses différentes, on n'entendrait pas la même musique selon que l'on est proche ou éloigné de l'instrument, ce qui n'est pas le cas. L'expression de la célérité du son dans un fluide compressible a été donnée par Laplace en 1816 :

$$c = 1/\sqrt{\chi\rho}$$

où χ est le coefficient de compressibilité du fluide et ρ sa masse volumique. En utilisant la masse volumique de l'air et la valeur de χ donnée par le modèle du gaz parfait, on obtient une valeur de c en très bon accord avec les données expérimentales. La dépendance en température mentionnée dans le focus ci-dessous provient de la diminution de la masse volumique de l'air quand sa température

augmente.

Focus

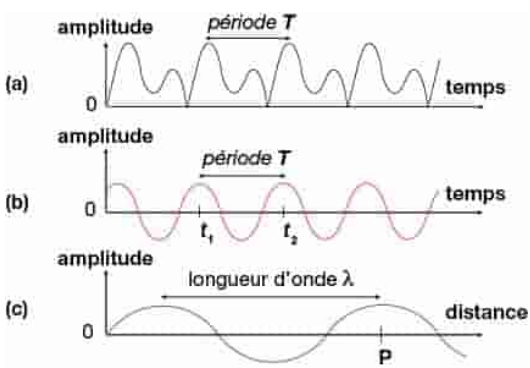
La mesure de la vitesse du son dans l'air

La première expérience fut organisée en 1738 par l'Académie des sciences. Un coup de canon tiré de Montmartre vers Montlhéry, distant de 28 km, fut entendu une minute et 23 secondes après avoir vu sa lueur. La lumière se propageant beaucoup plus vite que le son, on en déduit que la vitesse du son est égale à 337 m/s, environ 1 200 km/h. Les valeurs mesurées actuellement sont 331,5 m/s à 0 °C et 349,2 m/s à 30 °C.

Une onde qui propage un son périodique possède une double périodicité :

• *En un point donné*, son amplitude varie de façon périodique avec le *temps* (figures a et b page suivante).

• *À un instant donné*, l'amplitude est une fonction périodique de la *distance*. Cette fonction est représentée sur la figure c pour le son sinusoïdal de la figure b. Au point P, l'amplitude passe par un maximum à l'instant t_1 de la figure b. Le maximum suivant arrive en P à l'instant $t_2 = t_1 + T$, après avoir parcouru la distance $\lambda = cT$, où c est la célérité de l'onde. La distance λ qui caractérise la périodicité dans l'espace est la *longueur d'onde*.



Variation de l'amplitude de sons périodiques.

(a) Variation temporelle de l'amplitude d'un son périodique de période *T*.
(b) Variation temporelle de l'amplitude d'un son *sinusoïdal* de période *T*.
(c) Variation de l'amplitude avec la distance pour le son (b).

Tout objet qui se déplace rapidement dans l'air génère des ondes sonores. Quand sa vitesse atteint celle du son, ces ondes se concentrent devant l'objet, et on a cru longtemps que les

instabilités créées par le « mur du son » empêcheraient de dépasser sa vitesse. On sait aujourd'hui qu'il n'en est rien. Le « mur du son » a été franchi par un avion en 1947, et même récemment par un homme en chute libre ! En 2012, le sauteur extrême autrichien Felix Baumgartner s'est fait hisser à 40 km d'altitude par un ballon stratosphérique, et il s'est laissé tomber. Il a atteint la vitesse de 1 360 km/h, une vitesse très supérieure à celle de l'animal le plus rapide, le faucon pèlerin, qui effectue des piqués à 380 km/h. Le sauteur avait pris soin de revêtir une combinaison d'astronaute, isolante et pressurisée.

© Getty Images

Faucon pèlerin.

Les êtres vivants peuvent déterminer la direction d'où vient le son. Le petit décalage qui existe entre les arrivées du son aux deux oreilles est analysé par le cerveau qui en déduit sa direction. Si la célérité du son était beaucoup plus grande, ce décalage serait trop bref pour être perçu. Les chauves-souris exploitent pleinement cet effet pour se repérer dans leur environnement et détecter leurs proies. Ces chasseurs nocturnes émettent par le larynx des impulsions d'ultrasons dont la fréquence est comprise entre 30 kHz et 130 kHz, et leurs grandes oreilles très sensibles détectent l'écho renvoyé par les obstacles. Le délai entre les instants d'émission et de réception donne une information sur la distance, et le décalage entre les deux oreilles donne la direction.

© Getty Images

Une chauve-souris aux oreilles particulièrement développées : l'oreillard.

La propagation du son dans l'eau

Quand on a la tête sous l'eau dans la mer ou dans une baignoire, on perçoit les bruits environnants, même s'ils sont très déformés. Et les plongeurs écoutent les sons qu'émettent les dauphins et les baleines. Les ondes sonores se propagent donc très bien dans l'eau. Nous avons affirmé précédemment que l'eau était incompressible dans les conditions habituelles. Pour un fluide rigoureusement incompressible, le coefficient de compressibilité est nul, et l'expression précédente donne une célérité infiniment grande. En réalité, le coefficient de compressibilité de l'eau est très petit, mais il n'est pas nul et on peut le mesurer. En reprenant sa valeur dans cette expression, on obtient $c = 1\,580$ m/s, en assez bon accord avec la valeur mesurée expérimentalement.

Focus

La mesure de la vitesse du son dans l'eau

L'expérience a été réalisée en 1827 sur le lac Léman par le physicien suisse Daniel Colladon et le mathématicien français Charles Sturm. Il faisait nuit, et chacun était dans une barque : l'un du côté suisse, l'autre du côté français. L'un d'eux déclenchait simultanément un signal lumineux et la percussion d'un marteau sur une cloche immergée. À 17 kilomètres de là, l'autre, qui avait l'oreille contre un tuyau vertical relié à un cornet acoustique immergé, déclenchait son chronomètre à la vue du signal. Une vitesse de 1 430 m/s fut déduite de la durée de 11,9 secondes mesurée. La valeur retenue actuellement est de 1 482 m/s dans l'eau pure à 20 °C.

Les caractéristiques des ondes sonores dans l'eau sont les mêmes que dans l'air : elles sont longitudinales, et leur célérité ne dépend pas de la fréquence. En effet, on étudie les sons émis par les mammifères marins en les captant avec des hydrophones. Si les sons de fréquences différentes n'arrivaient pas simultanément à l'hydrophone, cette opération n'aurait aucun sens. De nombreux mammifères marins pratiquent l'écholocalisation en émettant des sons dont la fréquence est comprise entre 100 Hz et 150 kHz. La réception a lieu au niveau de la mâchoire inférieure et des deux conduits auditifs. Ce système complexe, bien adapté à la célérité du son dans l'eau, permet à ces animaux d'analyser les échos avec une très grande précision. Les êtres humains s'efforcent de les imiter avec le *sonar* (acronyme de *SOund Navigation And Ranging*), qui sert à détecter les sous-marins et les bancs de poissons.

© Getty Images

Dauphin et son petit.

Les déformations de l'eau dues à la propagation des ondes sonores ont lieu à l'échelle moléculaire et sont invisibles. Nous nous intéressons dans la suite à des déformations faciles à observer. En revanche, elles sont plus difficiles à analyser…

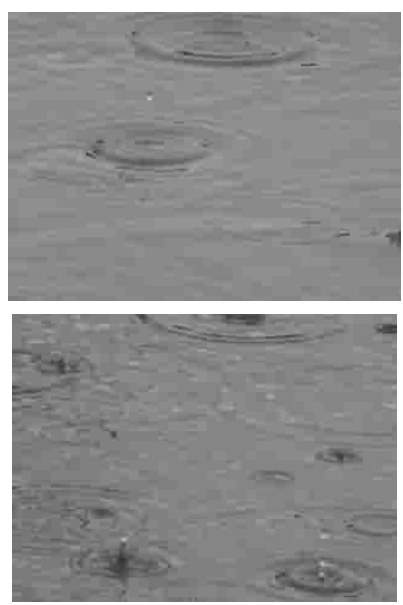
Quelle est l'origine des ondulations de la surface de l'eau ?

La surface de l'eau, comme celle de tous les liquides, est parfaitement horizontale au repos. Mais dans la nature, l'eau est rarement au repos. Quand nous voyons une « mer d'huile » s'étaler devant nous sur la plage, les minuscules vaguelettes qui viennent déposer un peu d'écume à nos pieds trahissent une faible agitation de sa surface. On a plus de chances de trouver de l'eau au repos dans une

petite mare bien abritée du vent ou dans un lac de montagne entouré de falaises. La présence de reflets nets est un bon critère, car la surface de l'eau ne les renvoie que si elle est parfaitement lisse et plane. Les mouvements qui déforment la surface de l'eau sont très variés. Il suffit de penser aux différents aspects du courant d'une rivière, aux vagues et au cas extrême des tsunamis. Nous allons décrire des phénomènes que tout le monde peut observer, et donner quelques explications sur leur origine. Ils se déplacent beaucoup plus lentement que le son dans l'eau et on peut les décrire en considérant que l'eau est incompressible.

Des rides sur l'eau

Il suffit de quelques gouttes de pluie pour animer la surface de l'eau. Chaque goutte génère des rides circulaires qui s'élargissent rapidement en s'atténuant. Si on filme l'impact d'une goutte avec une caméra rapide, on observe une succession de phénomènes complexes qui se termine généralement par un « rebond » et l'éjection d'une ou de plusieurs gouttelettes. On peut s'amuser à saisir ces rebonds avec un appareil photo.

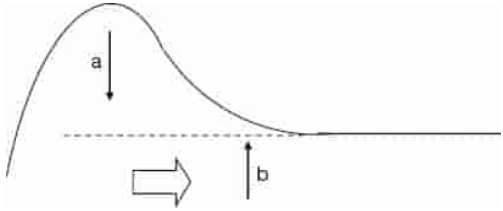


La pluie fait des ronds dans l'eau.

Les impacts des gouttes de pluie génèrent des « rebonds » qui forment des bourrelets et éjectent des gouttelettes.

Pourquoi une perturbation de la surface de l'eau provoque-t-elle systématiquement la propagation d'une ride ? La réponse n'est pas simple, mais nous allons essayer d'en donner une idée. Au début de

l'impact, la goutte creuse une dépression dans l'eau. Celle-ci étant *incompressible*, un « bourrelet » circulaire de même volume s'élève tout autour.



Coupe d'un bourrelet montrant de façon très schématique ce qui se passe juste après sa formation.

Les flèches fines sont des *mouvements*, la flèche pleine est une *compression*.

Deux forces tendent à le faire redescendre (flèche *a*) : son poids et la tension superficielle de l'eau qui se comporte comme une membrane élastique (voir figure page 74). L'eau sous le bourrelet subit une surpression qui comprime l'eau située à la périphérie (flèche large). Cette compression pousse l'eau dans la direction où la pression est la plus faible, c'est-à-dire vers le haut (flèche *b*) : le bourrelet initial descend pendant qu'un nouveau bourrelet apparaît à l'extérieur, et le processus recommence. Ces phénomènes se produisent de façon continue, si bien qu'on voit une ride circulaire se déplacer à partir du point d'impact. Il s'agit donc d'une onde *transversale*, qui se propage grâce au poids de l'eau et à la tension superficielle qui tendent à ramener la ride vers l'horizontale. On parle d'*ondes de gravité* quand l'effet du poids domine, de *rides capillaires* quand c'est celui de la tension superficielle.

Focus

Les rides circulaires s'atténuent en se propageant

On peut compléter cette description par un bilan énergétique. Lors de l'impact, l'énergie cinétique de la goutte est convertie en partie en chaleur, et une partie est utilisée pour soulever le bourrelet, qui possède donc de l'énergie potentielle. Quand la ride se propage, cette énergie potentielle se répartit sur un cercle dont le rayon s'accroît, et la hauteur de la ride diminue progressivement.

Pour étudier les ondes de surface en laboratoire, on se sert d'une cuve à ondes. Un vibreur, de fréquence connue, crée des ondes rectilignes ou circulaires, et un stroboscope synchronisé sur le vibreur permet de les observer. Quand on est dans la nature, on peut attendre

la pluie au bord d'une mare ou y jeter un caillou. Si on habite dans les pays nordiques, on peut observer le manège du phalarope à bec étroit. Ce petit limicole, qui passe l'été dans les toundras des régions arctiques, a mis au point une technique originale pour se procurer les larves aquatiques dont il est friand : il tourne très vite sur lui-même, créant un tourbillon qui fait remonter les larves vers la surface. La rotation génère également des rides capillaires circulaires très régulières.

Un pourvoyeur de rides circulaires : le phalarope à bec étroit (Islande).

La longueur du bec, 2 cm environ, donne l'échelle de l'espacement des rides.

Le sillage d'un bateau et d'un canard

Toute perturbation de la surface de l'eau engendre de nombreuses ondes sinusoïdales de différentes longueurs d'onde. Leur amplitude est très faible, et elles sont quasiment invisibles. Mais elles ont une propriété que n'ont pas les ondes sonores : leur célérité dépend de la longueur d'onde, c'est ce qu'on appelle la *dispersion*. Quand de nombreuses ondes de longueurs d'onde et donc de célérités différentes se propagent simultanément, leur superposition peut produire un « paquet d'ondes » d'amplitude beaucoup plus grande que celle de leurs composantes. Ce sont les *rides* que nous voyons, qui se déplacent à la vitesse dite *de groupe*.

Focus

La dispersion des ondes

Ce terme a d'abord été employé pour décrire la séparation par un prisme des rayons lumineux qui composent la lumière blanche. On a compris plus tard que chaque rayon est une *onde* de fréquence déterminée. Ces ondes se propagent dans le vide avec la célérité $c = 300\,000$ km/s. Mais dans les milieux matériels,

leur célérité dépend de leur fréquence et donc de leur longueur d'onde. La dispersion est à l'origine de nombreux phénomènes remarquables comme le rayon vert, le halo et l'arc-en-ciel (voir partie 4).

Les impacts des gouttes de pluie et des cailloux créent des rides qui s'élargissent et finissent par disparaître. Mais quand un corps *se déplace* sur l'eau, il génère en permanence de nouvelles ondes dont la superposition crée un *sillage* qui se déplace avec lui. En 1887, un physicien anglais, lord Kelvin, a fait remarquer que le sillage en forme de V des bateaux possédait des structures latérales en « sapin de Noël », et que le demi-angle du V était égal à 20° environ *quelle que fût la vitesse du bateau*. Il a montré que c'était la dispersion des ondes de surface qui était responsable de ces caractéristiques, et il a proposé un modèle pour l'expliquer.

Sillage d'un bateau.

Pendant cent vingt ans, le modèle de Kelvin a été considéré comme l'exemple type de démonstration d'une propriété très générale basée sur un raisonnement et un calcul relativement simple. Mais en 2013, deux physiciens français ont jeté un pavé dans la mare… Ils ont examiné de près de nombreuses photos aériennes de sillages de navires en mer et ont effectué des expériences avec des corps tractés en piscine. Ils ont constaté que le demi-angle du V est égal à environ 20° tant que le bateau et le corps ne vont pas trop vite. Mais au-delà d'une certaine vitesse qui dépend de la longueur du bateau ou du corps, l'angle diminue quand la vitesse augmente. Les chercheurs ont proposé un nouveau modèle qui rend compte de l'ensemble des observations. Ils se sont aussi intéressés au sillage des canards que l'on a souvent l'occasion d'observer sur les plans d'eau. La forme en V est bien visible avec un angle égal à 40° environ, mais les structures

latérales sont moins marquées que celles du sillage des bateaux. On peut l'expliquer en prenant en compte les effets de la tension superficielle.

Sillages d'un couple de canards colvert et d'un eider mâle.

On distingue à l'avant les ondes de surface très resserrées et, à l'arrière, la forme caractéristique du sillage.

La houle

Quand on souffle assez fort sur l'eau ou sur la soupe pour la refroidir, les frottements soulèvent la surface du liquide et des rides se propagent. C'est de cette manière, mais à une tout autre échelle, que se forme la houle. La circulation atmosphérique générale et le passage des perturbations créent des gradients de pression qui génèrent en permanence des vents partout sur Terre. Leurs directions et leurs vitesses sont très variables, et c'est en mer, où ils ne rencontrent pas d'obstacle, qu'ils soufflent le plus fort. Quand le vent souffle assez longtemps dans la même direction sur une grande étendue, le frottement sur l'eau soulève des rides qui s'organisent peu à peu pour former des rangées de vagues parallèles de grandes longueurs d'onde. C'est la houle, qui peut se propager sans s'amortir sur de grandes distances avant d'atteindre la côte.

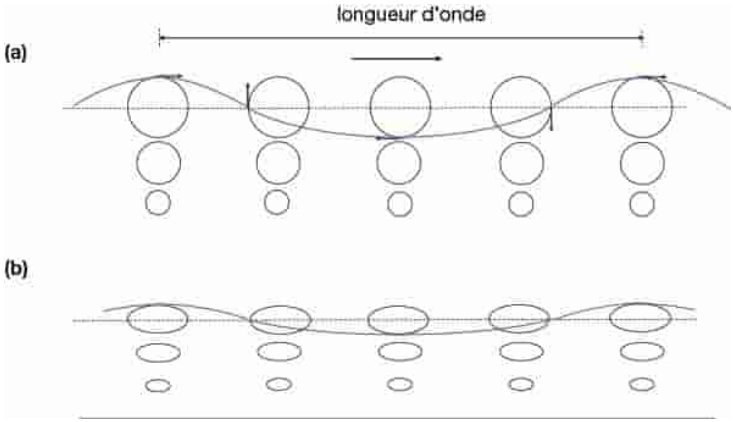
Photo Anne Bertrand

Une petite houle arrive sur la côte bretonne.

La direction de l'écume montre que la houle progresse contre le vent.

Au large, la houle est une onde de gravité en eau profonde dont la célérité est donnée par la relation approchée $c(\lambda) \approx 1{,}25\sqrt{\lambda}$. On a, par exemple, $c = 8{,}8$ m/s pour $\lambda = 50$ m, et $c = 4$ m/s pour $\lambda = 10$ m. La houle déforme la surface de l'eau et elle l'affecte aussi en profondeur. Les particules d'eau suivent une trajectoire circulaire dont le rayon diminue en profondeur (figure a page suivante). Pendant qu'une particule fait un tour complet, l'onde progresse d'une longueur d'onde. L'amplitude de la vague étant beaucoup plus petite que la longueur d'onde, on en déduit que la vitesse des particules est très inférieure à la célérité de la houle.

À l'approche de la côte, la profondeur d'eau devient plus petite que la longueur d'onde, les trajectoires des particules s'aplatissent et deviennent des ellipses (figure b page suivante). Enfin, quand la profondeur devient beaucoup plus petite que la longueur d'onde, la célérité devient indépendante de la longueur d'onde et s'écrit $c = \sqrt{gh}$, où h est la hauteur d'eau : les vagues ralentissent, et leur forme devient dissymétrique. En effet, la hauteur d'eau étant plus grande au niveau des crêtes, celles-ci se déplacent plus vite que les creux, et le flanc des vagues devient plus raide du côté de la côte. À l'arrivée sur la plage, la remontée du fond oblige la vague à s'élever. Elle se cambre et finit par basculer en avant sous son propre poids : elle déferle, en dissipant en chaleur l'énergie que la houle avait reçue du vent parfois à des milliers de kilomètres de là. Les ondes de surface illustrent un fait général : les ondes ne transportent pas de la matière, mais de l'*énergie*.



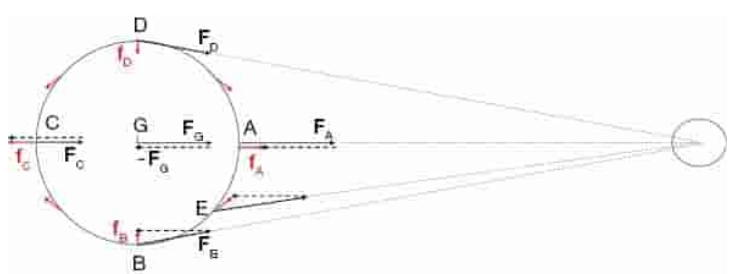
Mouvement des particules d'eau au passage de la houle qui se déplace de la gauche vers la droite.

(a) En eau profonde, les particules d'eau suivent des trajectoires circulaires. Leur vitesse est représentée en quelques points caractéristiques par une flèche. La surface (en bleu) n'est pas symétrique par rapport au niveau de repos figurée en tirets.
(b) En eau peu profonde, les trajectoires s'aplatissent.

Comment se produit le mouvement des marées ?

Les marées sont des déformations d'ensemble des masses d'eau qui couvrent notre planète. Elles sont rythmées par la rotation de la Terre et par son déplacement relatif par rapport à la Lune et au Soleil. Quand un astre exerce une attraction sur la Terre, chacun de ses éléments est soumis à une force égale à la différence entre la force d'attraction que l'astre exerce sur lui et la force d'attraction qu'il exerce au niveau du centre de gravité G. Cette différence est la *force génératrice de la marée*. Sur la figure page suivante, la force d'attraction **F** exercée par la Lune (en noir) est représentée au centre de gravité G de la Terre et en divers points de sa surface. Elle est dirigée vers le centre de gravité de la Lune, et son intensité varie avec la distance r comme $1/r^2$. Elle varie donc dans l'ordre :

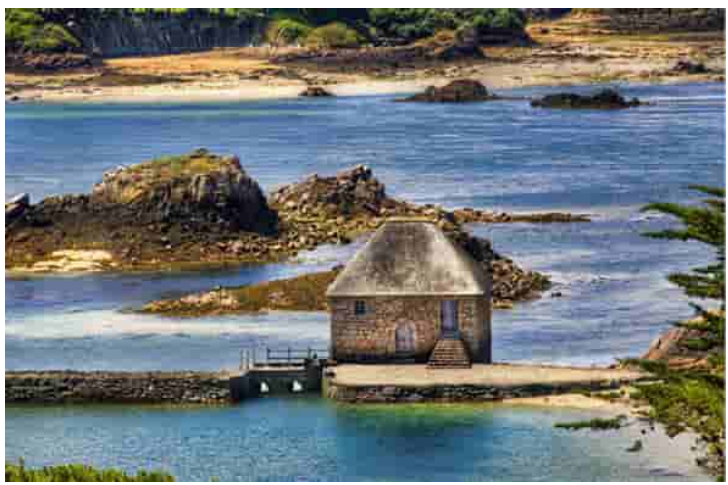
$$F_A > F_E > F_G > F_B = F_D > F_C$$



La force F d'attraction de la Lune, et la force génératrice de la marée f, sont représentées en divers points de la surface terrestre.

Cet ordre est respecté sur la figure, même si les distances ne sont pas du tout à l'échelle (la distance Terre-Lune est égale à 60 rayons terrestres). On obtient la force génératrice de la marée **f** en retranchant à **F** la force $\mathbf{F}_G$, c'est-à-dire en ajoutant à son extrémité le vecteur $-\mathbf{F}_G$ représenté en pointillés. La figure montre que la direction et l'intensité de **f** varient beaucoup selon le point considéré. L'intensité est maximale au point A, où la verticale pointe vers la Lune, et au point antipodal C. En ces deux points, elle tend à *soulever* la surface. Elle est deux fois plus petite en B et D, où elle tend au contraire à *comprimer* la surface. Au point E, la force possède une composante normale et une composante tangentielle.

L'ensemble des forces **f** tend à créer un renflement aux points A et C. Si la Terre était entièrement recouverte par les océans et si son axe de rotation était perpendiculaire à l'axe Terre-Lune, il y aurait deux marées hautes par jour, qui se produiraient au même moment en un point et à son antipode. Mais pour connaître l'amplitude de la marée en un lieu donné à un instant donné, il faut tenir compte de l'inertie de la masse d'eau et de nombreux facteurs : la rotation de la Terre, le déplacement de la Lune autour de la Terre, l'attraction du Soleil qui atteint à certains moments presque la moitié de celle de la Lune, l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de l'écliptique, et l'inclinaison de la trajectoire de la Lune sur l'écliptique. À ces facteurs astronomiques s'ajoutent des facteurs géographiques qui font, par exemple, que le marnage est particulièrement important dans la baie du Mont-Saint-Michel.



© Getty Images

Le moulin à marée de l'île de Bréhat (Côtes-d'Armor), construit en 1633.

L'étang visible au premier plan se remplit à marée montante et son eau fait tourner la roue du moulin à marée descendante.

Mais aussi…

L'effet de marée

Les forces génératrices de la marée déforment aussi la croûte de la Terre. C'est la « marée terrestre », dont l'amplitude est de l'ordre de la vingtaine de centimètres. Les satellites des planètes géantes sont soumis à des effets de marée énormes qui les déforment et produisent de la chaleur (voir partie 5).

Faire monter l'eau

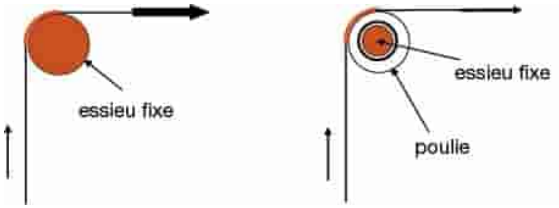
Les bêtes attendent devant le puits, le lourd timon de bois craque et grince quand elles font un pas en avant. Juba tire la corde attachée au joug, et la roue commence à gémir, comme un bateau qui s'ébranle. Les bœufs gris marchent lourdement sur le sentier circulaire. Leurs sabots se posent sur les traces de la veille, creusent les anciens trous dans la terre rouge. Au bout du long madrier, il y a la grande roue de bois qui tourne en même temps que les bœufs, et son axe entraîne l'engrenage de l'autre roue verticale. La longue lanière de cuir bouilli descend au fond du puits, portant les seaux jusqu'à l'eau.

J.M.G. Le Clézio, Mondo et autres histoires : « La Roue d'eau »

Les besoins en eau douce pour boire, cuisiner, abreuver le bétail et irriguer les cultures, ont conduit les hommes à s'installer à proximité des sources, des cours d'eau et des lacs. Ils ont construit très tôt des dispositifs pour élever l'eau au niveau où ils voulaient l'utiliser et pour drainer les marécages. Plusieurs de ceux qui ont été conçus dès l'Antiquité sont restés pratiquement inchangés durant des millénaires, et certains sont encore employés de nos jours.

Qu'est-ce qu'une machine élévatrice d'eau ?

Un simple barreau cylindrique fixé en travers de la margelle d'un puits permet de hisser un seau d'eau en tirant *horizontalement* sur la corde et d'utiliser la traction animale. Mais la corde frotte beaucoup sur le barreau et la traction à exercer dépasse nettement le poids du seau (figure a). L'invention de la *poulie* a marqué un progrès décisif : le frottement de la corde sur la gorge de la poulie la fait tourner, et celle-ci ne subit qu'un faible frottement de roulement de la part de l'essieu (figure b).



Rôle de la poulie.

La partie de la corde qui frotte sur le barreau et sur la gorge de la poulie est en rouge.

La roue est apparue vers – 3 500 ans en Mésopotamie, en Inde et en Iran, et il est probable que la poulie a été inventée très tôt en divers lieux. Une poulie figure sur un bas-relief assyrien daté de – 870 ans.

Les véritables machines élévatrices sont beaucoup plus récentes. La chaîne à godets, apparue au IIe siècle avant notre ère, délivre un débit d'eau quasi continu. Une chaîne équipée de godets tourne dans un plan vertical. Les godets puisent l'eau et remontent. En haut, ils déversent leur eau dans une auge avant de redescendre (schéma page suivante). Un système à engrenages permettait d'utiliser la force animale. Ce système simple et robuste a perduré très longtemps. Il était encore utilisé en France dans certains villages au milieu du XXe siècle. La rotation de la chaîne était assurée par une manivelle actionnée à la main. D'anciennes chaînes à godets ont été récemment remises en état au titre du patrimoine local.

La chaîne à godets.

D'anciennes manivelles de chaînes à godets ont été reconverties dans la décoration. On distingue sur celle de droite l'auge dans laquelle les godets déversaient l'eau.

Dès l'Antiquité, on a conçu des machines élévatrices à grand débit pour alimenter les canaux d'irrigation. Au IIIe siècle avant notre ère, Archimède avait imaginé la *vis* qui porte son nom pour écoper l'eau des navires : quand on fait tourner la *vis,* une sorte de foret géant, l'eau monte et se déverse dans une goulotte. Cette vis a été exploitée pour l'irrigation. La rotation des grosses machines était assurée par des hommes qui marchaient dans une « cage d'écureuil » (schéma page suivante). La vis d'Archimède est toujours utilisée de nos jours pour extraire le grain des silos et pour transporter les matières pulvérulentes.

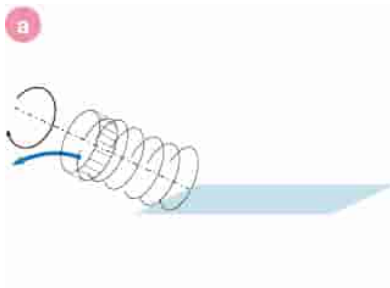
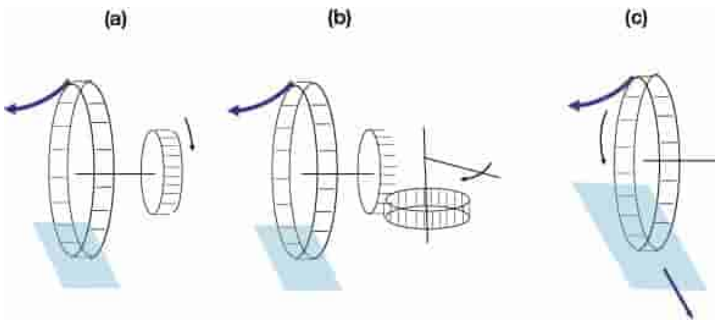


Photo Alain Bertrand

La vis d'Archimède.

(a) La rotation de la vis fait monter l'eau qui est déversée dans une goulotte.
(b) Moulin de *drainage* à vis d'Archimède utilisé en 1875 aux Pays-Bas. La vis est à l'intérieur du cylindre incliné et l'eau se déversait dans le canal circulaire.

La roue à augets fonctionne sur le même principe que la chaîne à godets, mais les augets qui remontent l'eau sont fixés sur une grande roue. Celle-ci était actionnée par une cage d'écureuil (figure a ci-dessous) ou par la rotation d'une roue horizontale grâce à un système d'engrenages (figure b). Toutes ces machines étaient mues par la force des hommes ou des animaux. La *noria* a constitué une innovation très importante : une grande roue à aubes équipée d'augets tourne grâce au courant de la rivière où l'eau est puisée (figure c). Les norias sont sans doute apparues au Moyen-Orient au IIIe siècle avant notre ère. Elles ont été très utilisées au Moyen Âge et certaines fonctionnent encore. Elles ont vraisemblablement inspiré la roue des moulins.



(a) et (b) Roues à augets ; (c) noria.

En 1608, Henri IV a fait adosser au Pont-Neuf une machine élévatrice qui fonctionnait sur le principe des norias. Elle était surmontée d'un bâtiment dont la façade était ornée d'une sculpture représentant Jésus-Christ et la Samaritaine. La « Samaritaine » a remonté l'eau de la Seine jusqu'en 1813. En 1684, une noria fut installée à Marly pour prélever l'eau de la Seine. Celle-ci était ensuite pompée dans un château d'eau situé 150 m plus haut, et un aqueduc l'amenait jusqu'aux jardins de Versailles.

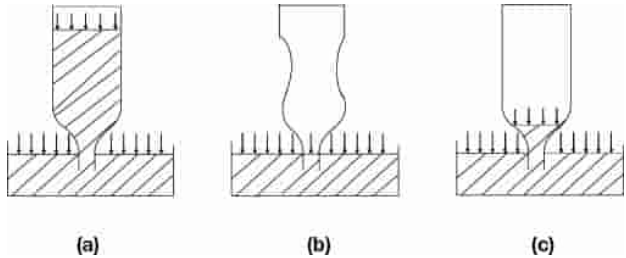
Comment faire monter l'eau en se servant de la pression atmosphérique ?

La pression atmosphérique se manifeste chaque fois qu'un volume où existe une dépression est mis en contact avec l'air. Quand on ouvre

un paquet de café « sous vide », un peu d'air entre et ça fait « pschitt ! ». Pour dévisser le couvercle d'un pot de confiture, on fait entrer de l'air et ça fait « poc ! ». Quand on appuie fermement une ventouse sur un mur lisse, l'air intérieur est en partie chassé, la pression atmosphérique comprime la ventouse et empêche de la retirer. Mais on peut faire des expériences bien plus instructives avec une bouteille en plastique et de l'eau.

Aspirer l'eau dans une bouteille

On commence par remplir la bouteille, on visse son bouchon et on la retourne sur la cuvette remplie d'eau. Si on dévisse le bouchon dans l'eau, l'eau descend à peine dans la bouteille (figure a page suivante). La colonne d'eau ne tombe pas parce que la pression due à son poids et à la pression de l'air au fond de la bouteille est équilibrée par la pression atmosphérique qui s'exerce sur l'eau de la cuvette. Si on perce un petit trou au fond de la bouteille, la colonne d'eau communique avec l'atmosphère et retombe. Dans une deuxième expérience, on écrase la bouteille vide et on la replace en la maintenant écrasée (figure b). La pression de l'air dans la bouteille étant égale à la pression atmosphérique, le niveau de l'eau est le même que dans la cuvette. Mais si on laisse la bouteille reprendre sa forme, un peu d'eau monte (figure c). Quand la bouteille s'est regonflée, l'air qu'elle contenait a occupé un volume plus grand que lorsqu'elle était écrasée, et sa pression a diminué : une *dépression* est apparue dans la bouteille. L'équilibre étant rompu, l'eau poussée par la pression atmosphérique est montée dans la bouteille jusqu'à ce qu'un équilibre semblable à celui de la figure a soit réalisé.



La pression atmosphérique, la bouteille et l'eau.

Les flèches symbolisent la pression exercée par l'air sur l'eau.

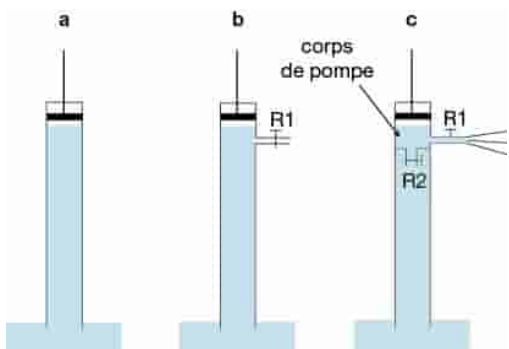
Mais aussi…

Aspirer une boisson avec une paille et inspirer l'air

Pour aspirer le jus de pomme d'un verre avec une paille, nous gonflons nos poumons. Une dépression apparaît dans la cavité buccale, et la pression atmosphérique pousse le jus de pomme qui monte dans la paille. Il se passe la même chose quand nous inspirons l'air par la bouche ou par le nez. Et c'est en comprimant nos poumons que nous l'expirons. On dit qu'on aspire un liquide ou de l'air, mais en réalité, c'est la pression atmosphérique qui pousse !

La pompe à eau aspirante

On peut faire monter l'eau beaucoup plus haut en tirant sur un *piston* qui coulisse dans un cylindre fermé (figure a page suivante). Si on désire faire sortir l'eau arrivée en haut du cylindre on ajoute une vanne R1 (figure b), qui est, bien sûr, fermée quand on tire sur le piston. Mais cela ne suffit pas : si on ouvre la vanne, la colonne d'eau est en contact avec l'atmosphère et retombe. Il faut donc ajouter une deuxième vanne R2 pour isoler l'eau contenue dans la partie supérieure appelée « corps de pompe ». Cette vanne était ouverte quand on a fait monter l'eau. Quand le corps de pompe est rempli, on ferme R2 et on vide l'eau en ouvrant R1 et en poussant le piston (figure c).



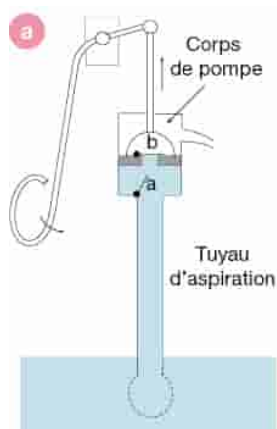
Principe d'une pompe à eau aspirante.

On ferme ensuite R1, on ouvre R2 et on remplit à nouveau le corps de pompe en tirant le piston : on pompe ainsi chaque fois le volume d'eau contenu dans le corps de pompe. Au début de l'opération, le cylindre est généralement rempli d'air à la pression atmosphérique, et l'eau est au même niveau dans le cylindre et dans la nappe d'eau, comme sur la figure b de la page précédente. Les premiers cycles de pompage servent à évacuer l'air en créant une dépression dans le corps de pompe, ce qui permet à l'eau de monter chaque fois un peu plus : on « amorce » la pompe. L'eau finit par entrer dans le corps de

pompe et peut sortir par le robinet.

À quelle hauteur peut-on faire monter l'eau avec cette pompe ? La pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer est égale à 1 013 hPa. On peut donc faire monter l'eau jusqu'à ce que la pression à la base de la colonne d'eau soit égale à 1 013 hPa. Si on pouvait évacuer complètement l'air du corps de pompe, cette pression serait due uniquement au poids de l'eau. D'après le calcul fait à la page 85, cette pression correspond à une hauteur de 10,33 mètres d'eau. Mais il reste toujours un peu d'air dans le corps de pompe, et la hauteur maximale est plutôt de 7 à 8 mètres.

Les vraies pompes aspirantes ne sont pas équipées de vannes, mais de *clapets* qui s'ouvrent et se ferment sous l'effet des variations de pression (figure a page suivante). Dans ces pompes, le piston est troué : quand on le tire, son clapet *b* se ferme et le clapet *a* s'ouvre : l'eau monte dans le corps de pompe. Quand on repousse le piston, *a* se ferme et *b* s'ouvre : l'eau est refoulée à travers le trou du piston et s'écoule à l'extérieur. On actionnait autrefois ces pompes à la main pour faire monter l'eau des puits et des bassins. Les photos montrent deux variantes. On voit en haut la tige du piston et en bas le raccordement du corps de pompe au tuyau d'aspiration plus étroit. Dans la pompe de gauche, c'est le balancement d'un levier qui crée le va-et-vient du piston. Dans l'autre, c'est la rotation d'une manivelle (voir complément page 126).



Pompes à eau aspirantes.

(a) Le piston troué (gris) est en train de monter.
(b) Deux pompes aspirantes dans un village de Lozère.

Le baromètre

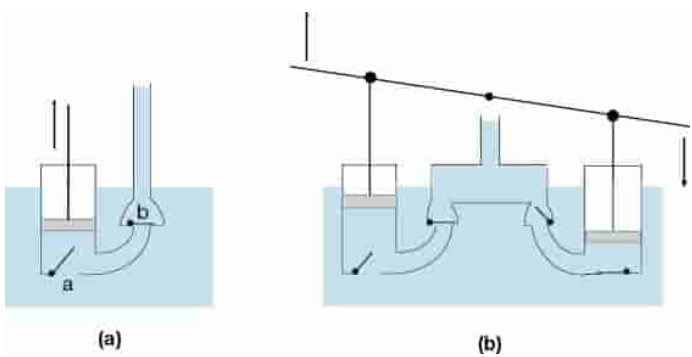
Puisque la pression atmosphérique fait monter l'eau, on peut la *mesurer* en graduant un tuyau. Avec de l'eau, il faudrait grimper à 10 mètres de haut pour lire les graduations ! On remplace donc l'eau par un autre liquide, le mercure, dont la densité est égale à 13,6. Il monte à 76 cm quand la pression atmosphérique est égale à 1 013 hPa. D'autres types de baromètres, dits anéroïdes, sont constitués d'une capsule vidée de son air et fermée par une mince membrane métallique. Lorsque la pression atmosphérique varie, la membrane se déforme, ce qui fait tourner une aiguille devant un cadran.

Ancien baromètre anéroïde.

Existe-t-il d'autres types de pompes ?

Les pompes foulantes

Le Grec Ctésibios, qui vivait à Alexandrie au IIIe siècle avant J.-C., a imaginé la pompe à piston immergée dite *foulante* (figure a page suivante). Quand on tire le piston, le clapet *b*, poussé par le poids de l'eau du tuyau d'évacuation, se ferme. Le clapet *a* poussé par la pression de l'eau s'ouvre, et l'eau monte dans le corps de pompe. Quand on pousse le piston, le clapet *a* se ferme, le clapet *b* s'ouvre et l'eau est *refoulée* dans le tuyau vertical. Dans la variante représentée sur la figure b, deux pistons sont couplés de telle manière que la pompe refoule l'eau pour les deux sens du mouvement du balancier. L'immersion complique un peu la construction et l'entretien de ces pompes. Mais contrairement aux pompes aspirantes, leur hauteur de pompage n'est pas limitée à 10 mètres, et elles n'ont pas besoin d'être amorcées. Les Romains les ont beaucoup utilisées, en particulier pour pomper l'eau dans les galeries de mines. La machine de Marly, citée précédemment, remontait l'eau prélevée dans la Seine grâce à plusieurs pompes foulantes disposées en série. On peut les modifier pour leur faire produire un jet puissant et quasi continu, ce qui leur a valu d'être utilisées longtemps pour éteindre les incendies.



Principe d'une pompe foulante.

La photo montre une voiture hippomobile équipée d'une « pompe à bras » qui a servi dans un village alsacien à la fin du XIXe siècle. On voit en bas la « bâche » qui contient les pistons immergés, et sa vanne d'alimentation. Au-dessus, le balancier muni de poignées qui actionnaient les deux pistons, et un conduit d'évacuation vertical sur lequel on branchait un tuyau. Le balancier était manœuvré par plusieurs personnes que l'on a fini par appeler des « pompiers ».

Ancienne voiture de pompiers à Niedermorschwihr (Haut-Rhin).

Au début du XIXe siècle, on se servait dans certaines régions d'éoliennes pour pomper l'eau des puits. La rotation de l'hélice était transformée par un système bielle-manivelle (voir complément page 126) en va-et-vient d'une tige verticale, qui actionnait le piston de la pompe foulante immergée au fond du puits. Elles étaient équipées d'une sorte de gouvernail qui les maintenait face au vent. La plupart de ces éoliennes sont aujourd'hui abandonnées, mais elles reviennent à la mode et on s'est mis à construire des modèles plus performants.

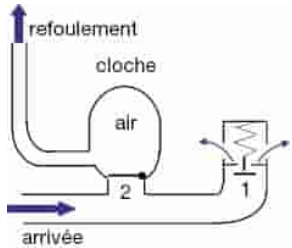
Ancienne éolienne de pompage dans les vignes (Vaucluse).

On devine la margelle du puits et la tige verticale qui actionnait le piston.

Le bélier hydraulique

Dans les anciens hôtels de montagne, la pression de l'eau courante était parfois un peu trop élevée. On était réveillé le matin par les vibrations bruyantes qui se produisaient dès qu'un client fermait un robinet. Quand un flux d'eau est arrêté très rapidement, la pression en amont augmente brusquement. C'est ce qu'on appelle le « coup de bélier », qui génère un choc bruyant très caractéristique. La

surpression se propage en amont en faisant vibrer les canalisations, au point parfois de les endommager. Mais on peut l'exploiter pour faire monter l'eau des ruisseaux ou des torrents plus haut que l'altitude du lieu de captage.



Principe du bélier hydraulique.

L'arrivée d'eau provoque la fermeture du clapet 1 qui crée une surpression. Celle-ci remonte, déclenchant l'ouverture du clapet 2. L'eau qui entre dans la cloche comprime l'air, ce qui ferme le clapet 2. L'air comprimé de la cloche pousse l'eau dans le tuyau de refoulement.

Au début, le clapet 2 est fermé et le clapet 1 ouvert. L'eau qui arrive sort par le clapet 1. Quand le débit est suffisant, ce clapet se ferme, ce qui génère le coup de bélier. La surpression remonte en amont et ouvre le clapet 2. L'eau pénètre dans la cloche, la pression de l'air augmente rapidement et le clapet 2 se ferme. L'air comprimé pousse alors l'eau de la cloche dans la conduite de refoulement. La pression au niveau du clapet 1 étant retombée, celui-ci s'ouvre, et le cycle recommence. Les ouvertures et fermetures périodiques des clapets génèrent un « tac ! tac ! tac ! » caractéristique. Cette pompe simple et robuste, qui fonctionne uniquement avec de l'eau courante, a été inventée en 1792 par un des deux frères Montgolfier, pour pomper l'eau destinée à la papeterie familiale d'Annonay, en Ardèche. On peut les installer partout où il y a de l'eau qui coule. Leurs performances sont remarquables et leur entretien facile. Elles ont été très utilisées au XIX^e^ siècle. Certaines sont encore en service, mais il n'y a plus beaucoup de constructeurs. Elles pourraient revenir à la mode dans le contexte actuel où l'on s'efforce de favoriser les énergies renouvelables.

Ce groupe de quatre béliers hydrauliques alimente un refuge en eau au cœur de l'Islande. Noter les formes variées des cloches.

Pourquoi la pompe aspirante a-t-elle fait évoluer les idées sur le vide ?

Au début du XVII^e^ siècle, on pensait que l'eau montait dans les tuyaux des pompes aspirantes parce que « la nature a horreur du vide », une explication conforme aux dogmes religieux de l'époque. On savait pourtant qu'on ne pouvait pas aspirer l'eau à plus de 7-8 mètres de hauteur, quel que fût le soin apporté à la construction des pompes. Pourquoi l'horreur du vide s'arrêtait-elle à cette hauteur ? Il y avait là un mystère. Le duc de Florence, qui aimait les fleurs, demanda à Galilée s'il pouvait augmenter la hauteur de pompage pour faciliter le travail de ses jardiniers. Galilée avait quelques idées sur la question, mais il était âgé et venait d'avoir de sérieux démêlés avec l'Inquisition. Il préféra confier le problème à son disciple Evangelista Torricelli. Celui-ci eut une idée de génie : pour comprendre comment fonctionnent les pompes, il remplaça l'eau par du mercure, un liquide 13 fois plus dense. Constatant que le mercure montait 13 fois moins haut que l'eau, il comprit qu'une pompe aspirante est une sorte de « balance » dans laquelle la pression créée par le poids de la colonne liquide est équilibrée par celle due au poids de l'air. Par la même occasion, il avait inventé le baromètre à mercure. Torricelli décrivit ses résultats, mais il se garda bien de donner son explication qui contredisait le dogme sur l'horreur du vide. Trois années passèrent. Nous sommes maintenant en 1646, à Rouen. Le jeune Blaise Pascal,

âgé de 23 ans, a déjà émerveillé ses contemporains par son génie mathématique. Il s'intéresse à l'équilibre des liquides, et les explications basées sur l'« horreur du vide » ne le satisfont pas. Ayant eu connaissance des expériences de Torricelli, il les reproduit, il obtient les mêmes résultats, il trouve la bonne explication et publie le tout. Par la suite, il a effectué d'autres expériences qui ont confirmé son interprétation (voir partie 3).

Pour rendre hommage à Pascal et à Torricelli, on a nommé *pascal* (abréviation Pa) l'unité légale de pression et *torr* la pression qui correspond à une hauteur de 1 millimètre de mercure. Notre corps contient une pompe très efficace, notre cœur, qui comprime le sang pour l'amener jusqu'à nos cellules. Les battements du cœur créent une surpression par rapport à la pression atmosphérique, que l'on appelle la *tension*. Un tensiomètre placé sur le poignet mesure les tensions maximale et minimale, ou systolique et diastolique, par exemple 130/80. L'unité est le millimètre de mercure, c'est-à-dire le torr. Notre cœur est donc capable de créer des surpressions égales au cinquième environ de la pression atmosphérique.

Complément

www.lienmini.fr/39798-cpltsP124

Le système bielle/manivelle

Se ravitailler en eau

Le Papet prit le bouchon de bois, le lança au loin, et se pencha : au fond du puits, un jet d'eau puissant aussi gros que le bras d'un homme, jaillissait de la roche, et disparut sous un tourbillon montant, qui creusait la paroi de terre et de gravier.

– On dirait qu'elle a forci, dit Ugolin. Il doit y avoir une drôle de provision derrière !

Marcel Pagnol, Jean de Florette : « L'eau des collines »

L'eau douce : où se trouve-t-elle et qu'en fait-on ?

L'eau douce ne représente que 2,5 % de l'eau présente sur Terre. Elle est essentiellement stockée sous forme de glace et de neige (69 %) et d'eau liquide souterraine (30 %). Le 1 % restant est l'eau dite « de surface ». Celle-ci se répartit entre les lacs (87 %), les marais (11 %), et les ruisseaux, les rivières et les fleuves (2 %). Ces chiffres montrent l'importance relative des différents « réservoirs » d'eau douce. Mais ces réservoirs ne sont pas disponibles partout, ni pour tout le monde. D'après l'OMS, 2 milliards de personnes (sur 7,5 milliards) n'avaient pas accès à l'eau potable en 2015. Le tableau page suivante donne la quantité d'eau domestique consommée *par jour et par personne* dans différents pays du monde.

Consommation d'eau domestique en litres par jour et par personne.

Entendre le chuchotement de l'eau qui coule du canon de la fontaine, c'est déjà se désaltérer.

En France, l'eau douce est prélevée pour différents usages dont les parts respectives sont indiquées dans la deuxième colonne du tableau page suivante. Cette eau est en partie *consommée*, le reste est *restitué*. Par exemple, dans les centrales thermiques et nucléaires, l'eau prélevée pour la production d'énergie est essentiellement utilisée comme liquide de refroidissement. Une faible partie de cette eau est consommée et la plus grande partie est renvoyée dans les cours d'eau où elle a été prélevée. Par contre, l'eau prélevée pour l'irrigation est entièrement absorbée par le sol, les plantes et l'évaporation. La troisième colonne donne les parts respectives de l'eau *consommée*. On constate que près de la moitié de cette eau est consacrée à l'irrigation.

Parts respectives (en %) des différents usages de l'eau prélevée et de l'eau consommée en France.

Dans notre pays, la consommation d'eau potable était de 106 litres par jour et par personne en 1975. Elle est passée à 165 litres en 2004 avant de redescendre à 148 litres actuellement. On attribue cette diminution au comportement plus responsable des consommateurs et à l'utilisation d'équipements moins gourmands en eau. Précisons que 66 % de notre eau potable est prélevée dans l'eau souterraine et 34 % dans l'eau de surface.

Des espaces à protéger : les zones humides

Les zones humides sont des espaces de transition entre la terre et l'eau. Ce sont les zones alluviales, les étangs, les bordures de lacs, les prairies humides, les tourbières, les mares temporaires et permanentes, etc. Leur rôle écologique est très important :

- Ce sont des « éponges naturelles » qui peuvent stocker l'eau et la

restituer. Elles participent à la régulation des crues et à l'alimentation des cours d'eau.

• Elles assurent une fonction de filtrage en piégeant, dégradant et transformant la matière minérale et organique.

• Les variations de leur niveau favorisent une production biologique élevée. Elles attirent des espèces animales variées, souvent rares et menacées.

• En stockant la matière organique, elles contribuent à réguler la concentration du CO_2 dans l'atmosphère.

Précisons ce dernier point. Pendant leur croissance, les végétaux utilisent l'énergie lumineuse pour incorporer le carbone du CO_2 dans des molécules organiques. Quand ils meurent, ces molécules sont en grande partie décomposées par des *micro-organismes* qui rejettent du CO_2 dans l'atmosphère. Dans certaines tourbières, comme celles à sphaignes, l'acidité de l'eau, la pauvreté en certains éléments, le manque d'oxygène, les basses températures en montagne et dans les régions arctiques, créent des conditions physico-chimiques très particulières.

Tourbière du lac Luitel dans le massif de Belledonne (Isère).

Les zones claires, où poussent quelques pins, sont des « radeaux » végétaux.
À droite, des droséras (plantes carnivores) parmi les sphaignes.

Celles-ci favorisent la croissance de certains végétaux, en particulier des mousses comme les sphaignes, et sont défavorables à l'activité des micro-organismes. La production de matière organique

par ces végétaux étant supérieure à sa décomposition, la matière organique morte s'accumule et ses couches profondes se transforment peu à peu en tourbe où le carbone reste séquestré. Les tourbières n'occupent que 3 % des terres, mais elles contribuent pour 30 % au piégeage du carbone dans le sol.

Mais aussi…

Tourbières et archéologie

Les morceaux de bois, les restes d'animaux et de végétaux et les pollens enfouis dans la tourbe se conservent très longtemps à l'abri de l'air. De nombreuses découvertes archéologiques ont été faites dans les tourbières. Dans celles des îles Britanniques, des Pays-Bas, du nord de l'Allemagne et du Danemark, on a retrouvé des corps humains très bien conservés datés de l'âge du Bronze jusqu'au haut Moyen Âge.

Depuis le début du XX^{e} siècle, la superficie des zones humides a diminué de 30 % sous l'effet des activités humaines : intensification des pratiques agricoles, aménagements hydrauliques inadaptés, croissance de l'urbanisation et des infrastructures de transport. Depuis 1975, les zones humides d'importance internationale sont protégées par la convention de Ramsar. Parmi les sites retenus en France, on peut citer, du nord au sud : la baie de Somme, le marais Vernier, les étangs de la Champagne humide, le golfe du Morbihan, le marais de la Grande Brière, le marais Breton, la Brenne, le marais de Chautagne (lac du Bourget), le delta de la Leyre (bassin d'Arcachon), les étangs littoraux de la Narbonnaise, la Camargue et les salins d'Hyères.

Peut-on distribuer l'eau par gravité ?

En plaine, les villages et les villes se sont installés au bord des cours d'eau. C'est dans les grandes plaines de Mésopotamie et dans la vallée du Nil que les machines élévatrices ont été mises au point. De nos jours, on utilise des pompes pour prélever l'eau dans les cours d'eau et dans la nappe phréatique.

Pompe aspirante dans un village alsacien.

Les châteaux d'eau

On a compris très tôt qu'il était judicieux d'élever l'eau dans un grand réservoir et de la distribuer ensuite par écoulement gravitaire. Dans l'Antiquité, les châteaux d'eau symbolisaient la bonne organisation de la distribution de l'eau. Au premier siècle après J.-C., il y avait à Rome 19 aqueducs, 250 châteaux d'eau et 1 350 fontaines. Durant une longue période qui va du Moyen Âge jusqu'au début du XIXe siècle, les châteaux d'eau ont été délaissés et remplacés dans les villes par des fontaines. En 1783, les 55 fontaines de Paris étaient alimentées par les sources des collines environnantes et par l'eau puisée dans la Seine, en particulier par la Samaritaine. Environ 20 000 porteurs d'eau prélevaient l'eau des fontaines et la distribuaient aux habitants. Au XIXe siècle, de nombreux châteaux d'eau ont été bâtis pour alimenter les chaudières des locomotives à vapeur. Une dernière vague de construction a eu lieu dans les années 1950-1980 pour amener l'eau sous pression dans les appartements.

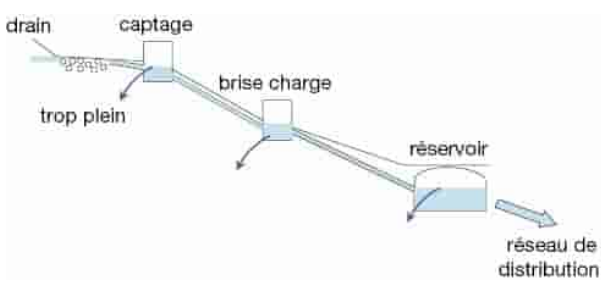
Les châteaux d'eau avaient des avantages. Ils assuraient la sécurité de l'approvisionnement pendant une durée de 12 à 24 heures. Ils ont, par exemple, été remplis à la veille du passage à l'an 2000 pour pallier un éventuel « bug » informatique ! Ils permettaient la décantation des impuretés et maintenaient une pression constante sur le réseau de distribution. Mais ils ont des inconvénients : leur coût de construction et d'entretien est élevé, et leur esthétique est souvent discutable. Ils sont de plus en plus remplacés par des réservoirs enterrés, dont l'eau est mise sous pression avant d'être distribuée. En 2007, il y avait encore en France 16 000 châteaux d'eau en activité, parmi lesquels certains sont classés monuments historiques. D'anciens édifices ont été reconvertis en habitations, parfois même en restaurants panoramiques !

© Getty Images

Un château d'eau aux lignes élégantes en Suède.

Les sources

L'eau de pluie s'infiltre dans les roches ou dans le sol jusqu'à ce qu'elle rencontre une couche imperméable qui la conduit vers un affleurement. Le débit et la pérennité d'une source dépendent beaucoup des conditions climatiques et de la nature du sol et du sous-sol. Les conditions sont généralement plus favorables en montagne : les précipitations y sont abondantes et les sources reçoivent l'eau de fusion de la neige ou de la glace. De plus, les versants des vallées sont tapissés d'alluvions fluvio-glaciaires qui contiennent souvent l'argile nécessaire pour amener l'eau à l'affleurement. Les villages de montagne sont souvent alimentés en eau potable par des sources dont l'eau arrive par simple gravité.



Captage d'une source par écoulement gravitaire.

Le trait noir représente le niveau du sol, les flèches bleues les trop-pleins.

Au niveau du captage, l'eau percole lentement à travers un drain de cailloux et de sable qui retient les particules les plus grosses. Le drain est protégé par une toile imperméable très résistante, et le tout est

soigneusement recouvert de pierres et de terre. Les communes doivent clôturer les zones de captage pour empêcher l'accès des animaux susceptibles de les polluer. L'eau arrive dans une boîte de captage, puis descend jusqu'à un réservoir en béton qui peut contenir plusieurs centaines de mètres cubes d'eau. Les particules les plus fines s'y décantent avant que l'eau ne soit envoyée dans le réseau de distribution. On ajoute des évacuations pour les trop-pleins et des vannes pour isoler certains tronçons, par exemple pour nettoyer le réservoir ou pour localiser et réparer les fuites. Les réservoirs sont généralement cylindriques et enterrés pour résister à la pression de l'eau et les protéger du gel. Entre la boîte de captage et le réservoir, on intercale parfois un ou plusieurs « brise-charges ». Supposons, en effet, que le captage soit situé 150 mètres plus haut que le réservoir. Si on ferme la vanne d'arrivée au réservoir, toute la canalisation se remplit, et la pression de l'eau au niveau de la vanne monte à 15 bars. Une telle pression pourrait détériorer les canalisations et créer des fuites. On intercale donc un ou plusieurs brise-charges dont le rôle est de dissiper l'énergie de l'eau et de la remettre à la pression atmosphérique. Si on prend quelques précautions, l'eau qui sort du réservoir peut être bue telle quelle. Chaque année, le réservoir est vidé et nettoyé avec un produit antibactérien biodégradable. L'eau qui coule au robinet est analysée, et les résultats sont indiqués sur la facture des abonnés. Dans les villages, l'eau des fontaines publiques est souvent la même que celle qui arrive aux robinets. Si elle n'est pas contrôlée spécifiquement, un panneau doit le signaler.

Entrée d'un réservoir d'eau potable.

La construction en béton et la porte métallique sont typiques des boîtes de captage, des brise-charges et des réservoirs. L'échelle appuyée sur le bord de la cuve repose sur une dalle. Sous la dalle se trouvent les vannes qui commandent l'arrivée d'eau, sa sortie vers le réseau et l'évacuation vers le trop-plein.

Comment faire venir l'eau ?

Les grandes quantités d'eau nécessaires pour alimenter en eau potable les grandes villes et irriguer les cultures ne sont pas souvent disponibles à proximité. Il faut alors construire des canaux pour la faire venir, parfois de très loin.

Alimenter les grandes villes en eau potable

Les Romains furent les champions des travaux hydrauliques. Une de leurs réalisations les plus spectaculaires est l'aqueduc construit au premier siècle après J.-C. pour amener une eau abondante et de qualité à la cité de *Nemausus*, c'est-à-dire Nîmes. L'eau était prélevée dans une rivière, et elle coulait dans un canal qui était couvert pour des raisons de salubrité mais aussi pour limiter l'évaporation. Il était long de 50 kilomètres environ, et sa pente moyenne était de 25 centimètres par kilomètre, soit 0,25 millimètre par mètre ! Bien sûr, il avait fallu creuser des galeries et construire de nombreux ouvrages d'art, parmi lesquels le célèbre pont du Gard qui enjambe le Gardon.

Cet ouvrage a inspiré une autre réalisation grandiose dans le Midi de la France. Les ravages des épidémies de choléra qui ont sévi à Marseille en 1834 et 1835 étaient dus en grande partie à la mauvaise qualité de l'eau potable. Il fut donc décidé d'alimenter la ville avec l'eau de la Durance : la construction du canal de Marseille débuta en 1839, sous le règne de Louis-Philippe, et dura dix ans ! La Durance n'est qu'à 50 km à vol d'oiseau, mais le canal devait traverser une région très vallonnée. Des travaux colossaux furent entrepris sous la direction de l'ingénieur Franz Major de Montricher. Il fallut creuser des kilomètres de galeries à travers les collines et bâtir de nombreux aqueducs. Le plus célèbre est celui de Roquefavour, qui permet au canal de franchir la vallée de l'Arc. Son architecture s'inspire de celle du pont du Gard, mais il est deux fois plus haut, près de 83 mètres. C'était à l'époque l'aqueduc en pierres le plus haut du monde, et il l'est resté. Il est d'ailleurs classé monument historique.

Photos Kristina Gayda

L'aqueduc de Roquefavour (Bouches-du-Rhône).

La Durance charrie souvent beaucoup de limon, et le canal traverse deux bassins de décantation avant d'arriver à Marseille. Son revêtement est bien entretenu, et on estime que les pertes sont de l'ordre de 15 %, ce qui est très raisonnable pour un ouvrage dont la longueur totale est de 180 km. Ces pertes sont dues principalement à l'évaporation. L'eau est, bien sûr, traitée dans des usines avant d'être envoyée dans le réseau d'eau potable. Ce canal fournit environ 60 % de l'eau consommée à Marseille. Le reste vient du Verdon par une branche du canal de Provence construite en 1973. Elle est stockée dans le réservoir du Vallon Dol.

Le canal de Marseille traverse les quartiers nord de la ville.

Le canal de Marseille joue un rôle important dans le roman *Le*

Château de ma mère de Marcel Pagnol. On sait moins qu'il apparaît dans le film *Jour de fête* de Jacques Tati. Ce film a été tourné en 1947 à Sainte-Sévère, dans l'Indre, mais la fameuse séquence où le facteur François rate un virage à vélo a été tournée près de La Roque-d'Anthéron, et le canal dans lequel il tombe, c'est le canal de Marseille !

© D. R.

***Jour de fête* dans une librairie de Gap.**

Les canaux d'irrigation en pays de montagne

De nombreux canaux d'irrigation ont été construits dès le Moyen Âge dans les vallées alpestres. La prise d'eau avait lieu dans un torrent en amont des terres à irriguer, et le canal suivait pratiquement une courbe de niveau au flanc de la vallée, parfois sur des dizaines de kilomètres. La nature du terrain obligeait souvent à creuser des galeries et à construire des ouvrages d'art pour traverser les vallons affluents. Les deux premières photos page suivante montrent deux aspects d'un canal construit au XVIIIe siècle dans le Champsaur. L'eau était prélevée dans le Drac, et le canal long de 30 km avait une pente moyenne de 1 mm/m. Des vannes étaient aménagées sur le parcours pour distribuer l'eau aux prairies et aux cultures. L'entretien de l'étanchéité du canal et des ouvrages d'art était très coûteux. Il fut abandonné dans les années 1960 et remplacé par l'arrosage par pompage et aspersion.

Ancien canal d'irrigation dans les Hautes-Alpes.

À gauche, le canal rempli par la pluie. La vanne réglable assurait la distribution de l'eau. À droite, franchissement d'un torrent.

La réalisation d'un canal pouvait être une entreprise beaucoup plus difficile. Celle du canal de Pellafol, en Isère, en est un exemple spectaculaire. La seule rivière du massif du Dévoluy, la Souloise, s'en échappe par des gorges profondes et coule ensuite 200 mètres en contrebas du plateau de Pellafol. Ce plateau, d'altitude moyenne de 950 m, était fertile mais insuffisamment arrosé. À la fin du XIX^{e} siècle, il fut décidé d'y amener l'eau de la Souloise prélevée en amont des gorges, à 1 015 m d'altitude. Le canal fut creusé dans la falaise qui domine les gorges, sous forme d'un balcon bordé d'un muret en pierres taillées.

Le canal de Pellafol creusé dans la falaise.

L'entaille horizontale révèle le trajet en balcon. Celui-ci se prolonge par un tunnel creusé dans la roche, sous l'éboulis visible à droite.

Certaines parties de la falaise étaient recouvertes d'éboulis immenses où toute construction était impossible, et un tunnel de 360 mètres dut être creusé dans la paroi rocheuse.

Deux aspects du canal de Pellafol.

Le balcon bordé par un muret s'arrête à l'entrée du tunnel creusé dans la roche.

La longueur totale du canal était de 10 kilomètres environ. Ces travaux gigantesques employèrent une importante main-d'œuvre locale et étrangère. Ils débutèrent en 1876, et la mise à l'eau eut lieu dès 1880. Mais on s'aperçut au bout de dix ans que le supplément d'eau apporté par le canal s'infiltrait dans le plateau et ressortait en fragilisant les bordures qui s'effondraient peu à peu. L'entretien du canal lui-même se révéla beaucoup plus onéreux que prévu, et son exploitation cessa en 1890.

Dans l'annuaire de la Société des touristes du Dauphiné, on trouve les lignes suivantes datées du 21 juillet 1885 : « Continuant de monter dans la direction nord-ouest à travers des pentes de débris, nous arrivâmes sans la moindre peine sur la large crête sud du Vieux-Chaillol où, à côté de l'aqueduc venant de Chaillol, on remarque les restes de plusieurs cabanes, sans doute occupées par les ouvriers employés à la construction de ce canal curieux. »

Elles sont signées du célèbre alpiniste américain W.A.B. Coolidge. On peut noter sa parfaite connaissance de notre langue, mais regretter

qu'il ne se soit pas davantage intéressé à un canal qui coulait à 2 700 m d'altitude ! Il faut dire à sa décharge qu'il était là pour enchaîner ascensions et escalades, et que sa journée était loin d'être terminée. L'eau ne coulait dans ce canal que depuis une dizaine d'années, mais c'était l'aboutissement d'un projet beaucoup plus ancien. Il s'agissait de prélever l'eau de fonte du glacier de Malcros, à 2 800 m d'altitude, et de la faire descendre jusqu'aux versants cultivés de la vallée, environ 1 500 mètres plus bas.

Photo 1 Amédé Simon Père

Le glacier de Malcros en 1910 et vue actuelle du lac de fonte (2 750 m).

Le début des travaux fut différé à plusieurs reprises. En effet, l'eau de fonte coulait auparavant dans un torrent qui alimentait d'autres communes de la vallée, et des conflits surgirent qui se réglèrent au tribunal. La réalisation de la partie supérieure, commencée en 1873, fut particulièrement difficile : en raison de l'enneigement, les travaux ne pouvaient avoir lieu qu'en juillet et août, et ils étaient régulièrement interrompus par des éboulements.

Galerie construite dans la partie supérieure (altitude 2 700 m).

Elle passe sous des éboulis et elle est régulièrement restaurée par les bénévoles de l'association « Malcros 2818 ».

Mais grâce à une main-d'œuvre nombreuse, l'eau commença à y couler dès 1874. Le canal descendait jusqu'à l'altitude de 2 350 m grâce à une section en cascade, puis l'eau se déversait dans le lit d'un torrent qui dévalait la pente avant de rejoindre la partie inférieure de construction plus classique. Là, on pouvait travailler toute l'année, mais la réalisation de nombreuses rigoles secondaires et du réseau de distribution ne se termina qu'en 1876. La partie principale du canal mesurait environ 9 km, mais la longueur totale de l'ouvrage avoisinait les 60 km. La mise en eau eut lieu en 1881. L'eau coulait dans la partie principale du canal, mais elle s'infiltrait progressivement et n'arriva jamais aux extrémités du réseau. Certaines sections furent peu à peu abandonnées. Les coûts d'entretien du canal étaient démesurés et son exploitation s'arrêta en 1923. Avec l'arrivée de l'électricité, on disposait de pompes puissantes et il était désormais plus facile de pomper l'eau dans des tuyaux que de la faire descendre par gravité dans des canaux. Les ouvrages d'art tombèrent en ruine, le canal se combla et fut recouvert par les éboulis et la végétation. Le glacier fondit, et un petit lac apparut en contrebas.

Quelques ouvrages d'art sur la partie inférieure, restaurés par l'association « Malcros 2818 ».

À gauche : après une descente en cascade, l'eau arrivait dans une martelière, où elle se décantait (altitude 1 860 m). Une vanne de décharge permettait de déverser une partie dans le torrent voisin. À droite, une autre martelière à 1 765 m.

En 2004, un groupe d'habitants de la vallée et d'ailleurs, motivés et passionnés par le patrimoine, décida de raviver à sa manière l'aventure humaine qu'avait été la construction du canal de Malcros. Depuis cette date, les bénévoles de l'association Malcros 2818 ont rendu visible le trajet du canal dans le paysage, ils ont restauré les ouvrages d'art les plus remarquables et ont mis en place une signalétique qui raconte son histoire. Plusieurs chantiers de restauration ont lieu chaque année. La partie supérieure du canal est située dans la zone centrale du parc national des Écrins, mais sa direction et ses agents facilitent ces travaux qui mettent en valeur un patrimoine montagnard particulièrement original.

Où stocker l'eau ?

Pour gérer la ressource en eau et assurer son approvisionnement, il faut la stocker. Les moyens mis en œuvre diffèrent en fonction de la destination de l'eau, comme le montrent les exemples suivants.

Des réserves collinaires…

Après la citerne creusée sous une habitation pour recueillir l'eau tombée de la toiture, la réserve collinaire est le moyen le plus simple de stocker l'eau. L'eau qui ruisselle est collectée, puis distribuée par gravité. Ces réserves sont généralement destinées à l'irrigation, mais elles servent parfois à d'autres usages.

Deux réserves collinaires dans les Hautes-Alpes.

Elles sont toutes deux ouvertes à la pêche, et celle de droite a accueilli le spectacle « Le piano du lac ».

Dans les communes où se trouvent des stations de ski, le même réservoir peut servir à l'irrigation et à la production de neige de culture : au printemps, la fonte des neiges gonfle les ruisseaux qui remplissent le réservoir, et l'eau est utilisée en été pour l'irrigation. Les pluies d'automne remplissent à nouveau le réservoir avant la saison de ski. Mais ce scénario idéal ne se réalise pas chaque année…

Réservoir destiné à l'irrigation et à la neige de culture.

… aux réservoirs géants

En 1957, la ville de Marseille et les départements des Bouches-du-Rhône et du Var s'unirent pour créer la Société du canal de Provence. Celle-ci avait pour mission de sécuriser l'approvisionnement en eau de

la basse Provence occidentale. Les travaux ont débuté en 1964 et des extensions se poursuivent encore de nos jours. L'eau est prélevée dans le Verdon en aval du barrage EDF de Gréoux, dans le haut Var. Une première branche part en galerie souterraine vers le réservoir de Bimont, construit entre 1946 et 1952 pour alimenter Aix-en-Provence.

Photo Nathalie Lefaux

Le barrage de Bimont et la Sainte-Victoire.

Une partie de cette eau part dans une galerie souterraine qui débouche dans le réservoir du Vallon Dol, au nord de Marseille.

Une immense oasis au nord de Marseille : le réservoir du Vallon Dol.

Ce dernier a été mis en service en 1973. Son volume représente une semaine de la consommation en eau de l'agglomération marseillaise. Il fournit environ 40 % de cette consommation, le reste arrivant par le canal de Marseille. Une deuxième branche du canal de Provence part en galerie souterraine vers Toulon et son agglomération.

Le canal de Provence dessert actuellement 110 communes, qui totalisent près de 3 millions d'habitants. Sa longueur est de 270 km, dont 140 km en souterrain. L'ouvrage comporte 82 barrages ou réservoirs, et totalise environ 5 000 km de canalisations d'adduction et de distribution.

3

Les phénomènes atmosphériques

Les états de l'atmosphère

– Bon. Eh bien, aujourd'hui encore les commandes gèlent : le volant est dur ; quant au palonnier, il est entièrement coincé !

– C'est gai. Quelle altitude ?

– Neuf mille sept.

– Quel froid ?

– Quarante-huit degrés. Et vous, l'oxygène, ça va ?

– Ça va, mon Capitaine.

Antoine de Saint-Exupéry, Pilote de guerre

Les passagers des avions savent-ils que l'air se raréfie au-dessus de leur tête et qu'ensuite, c'est le vide ? L'air dans lequel nous vivons ne constitue qu'une couche relativement mince. C'est la *troposphère*, qui contient environ 85 % de l'air et se termine vers 11 kilomètres d'altitude. Si on ramenait la Terre à la dimension d'un pamplemousse, ce serait une fine enveloppe d'un dixième de millimètre. C'est pourtant cette enveloppe qui a créé les conditions favorables à la présence d'eau liquide sur Terre et au développement de la vie.

Comment varie la pression atmosphérique quand l'altitude augmente ?

Peut-on ressentir la pression de l'air ?

L'air se manifeste à nous par ses *mouvements*. À l'intérieur, l'air chaud qui monte du convecteur anime le tulle qui voile la fenêtre. Dehors, les oiseaux et les parapentes s'élèvent, révélant les ascendances de l'air. Le vent caresse nos joues, il fait bruisser les feuilles des arbres et onduler les champs de blé. Il faisait autrefois tourner les ailes des moulins à vent, aujourd'hui ce sont les hélices des éoliennes.

Photo 1 Alain Bertrand

Ancien moulin à grains aux Pays-Bas et parc éolien en Ardèche.

Par contre, nous ne ressentons pas la *pression* que l'air exerce sur nous, car les fluides de notre corps sont à la même pression, à l'exception du sang de nos artères : nous vivons dans l'air comme les poissons dans l'eau. Nous sommes d'ailleurs soumis comme eux à une poussée d'Archimède, mais elle est très faible : la masse volumique de l'air étant huit cent fois plus petite que celle de notre corps, sa poussée ne nous « allège » que de 0,12 % de notre poids.

Les effets des variations de pression : sachet de chips et pot de yaourt

Quand on déballe les victuailles après une bonne ascension, on constate que le sachet de chips a gonflé et que le couvercle du pot de yaourt est bombé : ces « baromètres » nous indiquent que la pression de l'air au sommet est plus faible qu'à l'endroit où nous les avons achetés. La pression due au poids de l'air diminue quand l'altitude augmente, de la même manière que la pression due au poids de l'eau augmente avec la profondeur. Durant l'ascension, la pression des fluides de notre corps a diminué progressivement en suivant la pression atmosphérique, et nous n'avons rien ressenti. Mais quand la pression de l'air varie rapidement, nos oreilles nous le font savoir. Cela se produit parfois quand on monte ou descend une route de montagne en voiture, mais aussi dans les avions. À l'altitude de croisière, environ 10 000 mètres, la pression atmosphérique est très

inférieure à la pression au sol. Si la carlingue n'était pas solide, elle gonflerait comme le paquet de chips et exploserait. Pour diminuer les contraintes que subit la carlingue, la pression dans la cabine est ajustée à environ 750 hPa, la pression de l'air à 2 400 mètres d'altitude. Nos oreilles se manifestent quand on dépressurise la cabine après le décollage et quand on la repressurise avant l'atterrissage.

L'autre pari de Pascal

Pascal était convaincu que c'était le poids de l'air qui faisait monter le mercure dans le tube de Torricelli. Il n'y avait qu'une manière de le prouver : monter le tube assez haut pour que la diminution de pression fasse baisser le niveau du mercure. Pascal demanda à son beau-frère Florin Périer, qui habitait Clermont-Ferrand, de comparer la hauteur du mercure au centre de la ville et au sommet du puy de Dôme, plus haut de 500 toises, environ 975 mètres. Périer réalisa l'expérience en 1648 et observa une baisse du niveau du mercure de trois pouces une ligne et demie, environ 85 mm.

Anciennes unités de longueur en usage à Paris avant la Révolution française. La valeur des unités britanniques est aussi indiquée. Le pied est toujours utilisé en aéronautique.

Pascal était ravi. Un petit calcul lui montra qu'il pouvait observer cet effet à Paris à condition de monter assez haut. Ses expériences sont décrites dans le *Traité de l'équilibre des liqueurs et de la pesanteur de la masse de l'air* paru en 1663 :

> « Je fis l'expérience ordinaire du vide au haut et au bas de la tour St Jacques de la Boucherie haute de 24 à 25 toises. Je trouvai plus de 2 lignes de différence à la hauteur du vif-argent et ensuite je la fis dans une maison particulière haute de 90 marches où je trouvai sensiblement demi-ligne de différence, ce qui se rapporte parfaitement au contenu en la relation de Monsieur Périer. Tous les curieux le pourront éprouver eux-mêmes, quand il leur plaira. De cette expérience je tire beaucoup de conséquences, comme le moyen de connaître si deux lieux sont au même niveau, c'est-à-dire également distants du centre de la Terre ou lequel des deux est le plus élevé, si éloignés qu'ils soient l'un de l'autre, quand même ils seraient antipodes, ce qui serait comme impossible par tout autre moyen. »

Pascal a raison de se réjouir : il vient d'inventer l'altimètre !

La tour Saint-Jacques à Paris. Au pied de la tour, Pascal fait tranquillement ses calculs.

Quelles sont les caractéristiques de l'état de l'air qui varient avec l'altitude ?

Quand on monte en altitude, la *température* de l'air baisse. On le voit en montagne à la fin de l'automne et au début du printemps : on découvre après la pluie les versants « plâtrés » de neige fraîche, avec une limite pluie-neige quasi horizontale qui correspond à peu près à l'isotherme 0 °C.

Après une nuit de pluie en avril, on découvre au matin les versants saupoudrés de blanc au-dessus d'une certaine altitude.

Cette isotherme remonte très haut en été, à plus de 3 000 m : il ne pleut jamais au sommet du mont Blanc. L'origine de cette diminution de température apparaît quand on fait le bilan thermique de la Terre et de son atmosphère.

Mais aussi…

Dans l'avion de Saint-Exupéry

Du temps de Saint-Exupéry, les avions de chasse volaient à haute altitude pour ne pas être repérés. Leur cockpit n'était pas étanche et l'équipage devait supporter la pression et la température de l'air extérieur. Ils respiraient de l'oxygène avec un masque et portaient une combinaison chauffée par le moteur de l'avion.

L'état standard de l'atmosphère et l'altimètre

À une altitude donnée, la température de l'air dépend du lieu, du moment de la journée et du jour de l'année, et la pression varie en fonction des conditions météorologiques. Mais la façon dont la température et la pression *varient avec l'altitude* ne dépend pratiquement pas du lieu, ni du moment de la journée ni des conditions météorologiques. L'Organisation de l'aviation civile internationale a défini un « état standard » de l'atmosphère qui sert de référence pour la détermination de l'altitude des avions (tableau page suivante). La pression est calculée en utilisant un modèle dans lequel la température de l'air diminue de 0,65 °C tous les 100 m, jusqu'à 11 000 m. La température et la pression au niveau de la mer sont

fixées à 15 °C et 1 013 hPa, qui sont les valeurs moyennes déduites de mesures faites pendant une année sur l'ensemble du globe. Au-dessus de 11 000 m, la température reste constante, puis augmente : c'est le passage de la troposphère à la stratosphère.

Les pilotes d'avion et les randonneurs déterminent leur altitude avec un *altimètre*. C'est un baromètre anéroïde dont le cadran est gradué en altitude conformément à la correspondance altitude/pression de l'état standard de l'atmosphère. Comme il n'y a aucune raison pour que l'atmosphère soit dans cet état à l'endroit et au moment de la mesure, il faut faire une correction en *calibrant* l'altimètre grâce à un point d'altitude connue. Pour le randonneur, c'est l'altitude du point de départ lue sur un panneau ou sur la carte IGN.

Altimètre de randonnée.

Cet altimètre donne l'altitude de 0 à 5 000 mètres avec une précision de 10 mètres. La calibration s'effectue en faisant pivoter le cadran.

Pour un pilote d'avion, c'est l'altitude de l'aéroport de décollage. Cette procédure est possible parce que les corrections sont généralement faibles. On peut améliorer la précision en tenant compte de la différence entre la température locale et celle de la table. La quatrième colonne du tableau suivant donne la masse volumique de l'air ρ (*p*, *T*) calculée à partir du modèle du gaz parfait.

Variations de la pression, de la température et de la masse volumique de l'*air sec* en fonction de l'altitude, dans l'*état standard* de l'atmosphère.

Les effets du manque d'oxygène en altitude

L'air est essentiellement un mélange d'azote (78 %), d'oxygène (21 %) et d'argon (1 %). Chaque gaz produit une *pression partielle* proportionnelle au nombre de ses molécules, et la somme des pressions partielles donne la pression de l'air. Grâce au brassage

continuel de l'air, sa composition ne dépend pas de l'altitude, et les pressions partielles des différents gaz diminuent comme la pression atmosphérique. Au sommet du mont Blanc par exemple, à 4 810 m d'altitude, la pression atmosphérique est réduite de moitié par rapport à sa valeur au niveau de la mer, et il en est de même pour la pression partielle de l'oxygène.

Quand on séjourne longtemps en altitude, l'organisme compense le manque d'oxygène, l'*hypoxie*, en synthétisant davantage de globules rouges de façon à accélérer l'échange d'oxygène avec les cellules. C'est l'*acclimatation*. El Alto, une ville de Bolivie de plus d'un million d'habitants, est située à 4 150 mètres. C'est la ville la plus haute du monde. Grâce à sa situation proche de l'équateur, la température moyenne est de 7,5 °C. Ses habitants sont essentiellement des Indiens dont l'organisme s'est depuis longtemps acclimaté à l'altitude. Quand les alpinistes ne prennent pas le temps de s'acclimater avant une course en très haute montagne, leurs rythmes cardiaque et respiratoire s'accélèrent pour compenser le manque d'oxygène. Mais le mal aigu des montagnes (MAM) peut survenir et empêcher la progression. Les nausées et les vertiges commencent dès 3 000 mètres et peuvent évoluer en œdèmes pulmonaires ou cérébraux. Des troubles de la mémoire et de la coordination musculaire peuvent apparaître à 5 000 mètres et des hallucinations à 7 000 mètres. À 8 000 mètres, on atteint « la zone de la mort ». La température très basse et les vents violents y contribuent aussi.

Le mont Blanc vu du col d'Anterne.

Chaque année, des grues et des oies franchissent la chaîne himalayenne lors de leurs migrations de printemps et d'automne. Quelques-unes ont été équipées d'appareils de mesure miniaturisés, et l'étude des « paramètres de vol » a montré qu'elles ne volaient qu'à une soixantaine de mètres du sol et qu'elles passaient par les cols à 6 000 mètres d'altitude environ. Cette stratégie leur permet d'exploiter

les courants ascendants.

Faire cuire un œuf dur au mont Blanc

Contrairement à l'*évaporation* qui a lieu en surface à toute température, l'*ébullition* de l'eau se produit dans le volume à une température imposée par la pression de l'air (voir le premier complément page 171). Cette température, qui est par définition égale à 100 °C à 1 013 hPa, s'abaisse quand la pression atmosphérique diminue et donc quand l'altitude augmente. Les deux dernières colonnes du tableau suivant montrent comment la température d'ébullition de l'eau varie en fonction de la pression atmosphérique.

Variation de la température d'ébullition de l'eau en fonction de l'altitude.

La correspondance entre altitude et pression des deux premières colonnes est celle du tableau de la page 153. La diminution de la température d'ébullition de l'eau entraîne un allongement de la durée de cuisson des aliments dans l'eau bouillante. En gros, elle est multipliée par deux chaque fois que cette température diminue de 10 °C. À Marseille, la cuisson d'un œuf dur nécessite 10 minutes. D'après ce tableau, il faut environ 20 minutes à 3 000 mètres et 40 minutes à 6 000 mètres. Les alpinistes qui préparent leurs repas à haute altitude doivent en tenir compte, mais les habitants d'El Alto le vivent chaque jour. Pour accélérer la cuisson des aliments, il n'y a qu'une solution : faire monter la pression exercée par l'air sur l'eau dans laquelle cuisent les aliments. C'est le rôle des autocuiseurs : quand la pression atteint 1,8 bar, la soupape se met à tourner en libérant un mélange d'air et de vapeur d'eau. L'eau bout à 120°, ce qui accélère la cuisson d'un facteur 3 environ.

Mais aussi…

Cuire « à gros bouillons »

On croit souvent accélérer la cuisson dans l'eau bouillante en la chauffant jusqu'à produire de grosses bulles en surface. Ces bulles sont de la vapeur d'eau qui s'échappe dans l'air. Mais la température de l'eau et la durée de cuisson ne changent pas : le supplément de chaleur fourni à l'eau ne sert qu'à la faire s'évaporer plus vite et à remplir la cuisine de vapeur d'eau…

Comment naviguer en montgolfière ?

On décrit souvent le principe des vols en ballon de la façon suivante : quand un ballon de baudruche est rempli d'un gaz « plus léger » que l'air ambiant comme l'hydrogène, l'hélium ou l'air chaud, la poussée d'Archimède le fait monter. C'est vrai, mais il faut regarder les choses de plus près quand il s'agit de naviguer.

Une opération un peu longue, mais indispensable.

Dans les montgolfières, l'air que contient l'enveloppe est chauffé par une ouverture située à sa base. À cause de cette ouverture, la pression de cet air reste toujours égale à celle de l'air ambiant. Le poids du ballon l'attire vers le bas, mais la poussée d'Archimède, égale au poids du volume d'air ambiant « déplacé » par l'enveloppe, tend à le faire monter. Si le poids du ballon se réduisait à celui de l'air chaud, il suffirait que la masse volumique de l'air intérieur soit plus petite que celle de l'air ambiant pour que la poussée l'emporte. La masse volumique de l'air dépend de sa pression et de sa température (voir tableau page 153). La pression dans l'enveloppe étant la même que celle de l'air ambiant, il suffirait donc que la température de l'air intérieur soit plus élevée que celle de l'air ambiant. Mais le poids du ballon comprend aussi celui des passagers, de l'enveloppe, de la nacelle, et celui du brûleur et des bouteilles de gaz nécessaires pour chauffer l'air. À cause de ce supplément de poids, la température de l'air intérieur doit dépasser largement celle de l'air ambiant pour que la poussée l'emporte.

Voici quelques chiffres pour fixer les idées. L'enveloppe est généralement faite d'un tissu polyamide très résistant doublé d'une protection contre la chaleur. L'air intérieur est chauffé par la combustion du propane. Pour soulever quelques personnes, il faut, par

exemple, 2 000 m^3 d'air à 100 °C. La masse totale du ballon est alors de l'ordre de 2 400 kg répartis de la façon suivante : 1 900 kg d'air chaud et 500 kg pour l'enveloppe, le brûleur, les cylindres de propane et les passagers.

Le ballon monte dans l'air ambiant dont la pression et la masse volumique diminuent progressivement. La pression de l'air chaud suit celle de l'air ambiant et baisse également. Sa température étant maintenue à peu près constante, son volume augmente : l'air intérieur se dilate. Si l'enveloppe était complètement gonflée au décollage, son volume ne pourrait pas s'accroître et de l'air s'échapperait à la base, ce qui amoindrirait la poussée. On s'arrange donc pour que la poussée l'emporte sur le poids du ballon avant que l'enveloppe ne soit complètement gonflée. Pour arrêter l'ascension et descendre, le pilote ouvre une petite soupape située au sommet du ballon en tirant sur un câble. De l'air chaud s'échappe, ce qui réduit le volume et donc la poussée d'Archimède. Les déplacements horizontaux du ballon sont imposés par le vent, mais sa force et sa direction varient avec l'altitude, et le pilote peut gérer la navigation en montant ou en descendant. Il doit aussi tenir compte de ses réserves de propane et trouver un endroit favorable pour atterrir. Les baptêmes de l'air en montgolfière ont généralement lieu le matin. L'air ambiant est froid, ce qui augmente sa masse volumique et donc la poussée d'Archimède. L'atmosphère est plus calme, ce qui facilite la navigation.

Figure 10.7 : Une minute après le décollage.

Mais aussi…

Le premier vol en montgolfière

Il eut lieu le 21 novembre 1783 à Paris, plus précisément à La Muette située actuellement dans le 16e arrondissement. Le marquis d'Arlandes et Jean-François Pilâtre de Rosier avaient pris place à bord d'un ballon constitué d'une enveloppe de 2 200 m^3 d'air chaud et d'une galerie circulaire où ils entretenaient un feu de paille. Le ballon s'éleva rapidement jusqu'à environ mille mètres d'altitude. Poussé par un vent de nord-ouest, il survola la Seine, les Invalides, le jardin du Luxembourg et atterrit assez brutalement à la Butte-aux-Cailles, actuellement dans le 13e arrondissement. L'enveloppe avait commencé à s'enflammer, mais les dégâts furent minimes. Les deux hommes avaient parcouru environ 9 km en 45 minutes. Pilâtre de Rosier a continué l'aventure ; il est mort en 1785 en tentant de traverser la Manche en ballon.

Les transformations de la vapeur d'eau dans l'air

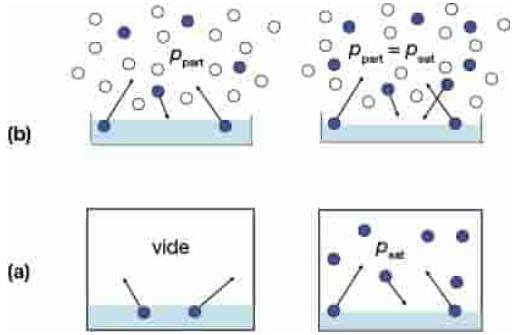
Le « super » – comme les trois hommes qu'il avait successivement arrêtés – en vint à souhaiter la réapparition du brouillard. Si celui-ci exerçait en effet une influence nocive sur l'assassin, tout espoir de prendre Mr. Smith sur le fait n'était pas perdu. Le 20, vers neuf heures du soir, les lumières des réverbères perdirent de leur éclat, une brume cotonneuse monta de la Tamise. Le fog était là !

Stanislas André Steeman, L'assassin habite au 21

L'air atmosphérique contient de la vapeur d'eau en quantité variable, inférieure à 4 %. Elle provient de l'évaporation de toute l'eau liquide présente à la surface de la Terre et de l'évapotranspiration des végétaux. Cette vapeur d'eau est invisible, mais elle se manifeste quand elle se condense en formant les gouttes d'eau de la rosée, les cristaux de glace de la gelée blanche et les gouttelettes du brouillard et des nuages.

Quand dit-on que l'air est saturé en vapeur d'eau ?

La figure a de la page suivante représente une enceinte fermée qui contient de l'eau, dans laquelle on a fait le vide. Des molécules sortent de temps en temps du liquide et de la vapeur se forme. Sa pression augmente, et des molécules peuvent rentrer dans le liquide. L'équilibre est atteint quand les flux sortant et entrant sont égaux : la quantité de vapeur et sa pression sont alors constantes. La pression d'équilibre est la *pression de vapeur saturante* p_{sat}. Elle ne dépend que de la température et croît rapidement avec elle. Habituellement, l'eau s'évapore dans de l'air qui contient déjà de la vapeur d'eau (figure b).

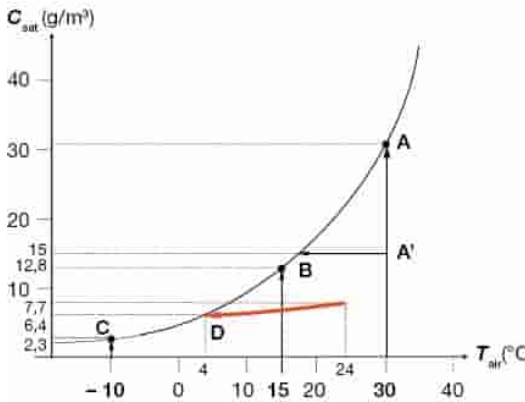


Évaporation de l'eau dans une enceinte vide et dans l'air.

Les molécules d'eau sont en bleu, les molécules de l'air en blanc.
(a) L'évaporation dans une enceinte initialement vide s'arrête quand la pression de la vapeur est égale à p_{sat}.
(b) L'évaporation dans l'air qui contient de la vapeur d'eau s'arrête quand la *pression partielle* de la vapeur est égale à p_{sat}.

L'évaporation a lieu si la *pression partielle* de la vapeur d'eau p_{part} est inférieure à la pression saturante, et elle s'arrête quand $p_{part} = p_{sat}$. On dit alors que l'air est « saturé en vapeur d'eau ».

Pour décrire l'évolution d'une masse d'air vers la saturation, il est commode de suivre la *masse de vapeur d'eau* contenue dans un mètre cube de cet air, c'est-à-dire sa masse volumique $\rho(p, T)$. Puisque la pression p_{sat} ne dépend que de la température, il en est de même de la masse volumique à saturation ρ_{sat}. La dépendance en température de ρ_{sat} est représentée sur la figure de la page suivante. Pour comprendre la signification de cette « courbe de saturation », considérons par exemple un mètre cube d'*air sec* à 30 °C, et supposons que l'on ajoute progressivement de la vapeur d'eau à 30 °C. Sur la figure, l'évolution de la masse volumique de la vapeur d'eau est représentée par la flèche qui part du point 30 °C de l'axe des abscisses et monte verticalement. Elle atteint le point A de la courbe de saturation quand la masse volumique est égale à 30,4 g/m^3. Si on ajoute encore de la vapeur, elle se condense sous forme de gouttelettes. Quand la température de l'air et de la vapeur est égale à 15 °C, on voit sur la figure qu'il suffit d'ajouter 12,8 grammes de vapeur pour arriver au point B de la courbe. Si elle égale à – 10 °C, il suffit de 2,3 grammes pour arriver en C et, dans ce cas, la condensation produit des microcristaux de glace.



Courbe de saturation de la vapeur d'eau.

La quantité ρ_{sat} est la masse volumique de la vapeur d'eau. Les flèches noires montrent différentes évolutions vers la saturation. La flèche rouge décrit l'évolution de la masse d'air ascendante de la figure de la page 164.

Le taux d'humidité de l'air

C'est une mesure de la quantité de vapeur contenue dans l'air, qui indique si l'air est plus ou moins proche de la saturation. C'est le *rapport* de la masse volumique de la vapeur d'eau contenue dans l'air à celle qui serait *saturante à la même température*. Reprenons l'exemple du mètre cube d'air à 30 °C. S'il contient 15 grammes de vapeur d'eau, son taux d'humidité est (15 /30,4) × 100, soit 49 % (point A' sur la figure ci-dessus). Le taux atteint 100 % quand l'air contient 30,4 grammes de vapeur d'eau (point A). Si on ajoute encore de la vapeur d'eau, celle-ci se condense et le taux d'humidité reste égal à 100 %. On mesure le taux d'humidité avec un *hygromètre*.

Mais aussi…

L'hygromètre à fil

Certains fils très fins absorbent l'eau et s'allongent quand l'humidité de l'air augmente. Quand elle diminue, l'eau s'évapore et le fil se raccourcit. Un dispositif adéquat transforme la variation de longueur en rotation d'une aiguille. On peut utiliser un fil de coton, de nylon, ou même un cheveu soigneusement dégraissé. À température ambiante, un cheveu s'allonge de 2 % environ quand l'humidité de l'air passe de 0 à 100 %. Les cheveux blonds seraient les meilleurs…

Notre organisme est très sensible à l'humidité de l'air, et il semble qu'un taux d'humidité de 50 à 60 % soit celui qui lui convienne le

mieux. Quand l'air est trop sec, les muqueuses respiratoires et les alvéoles pulmonaires se dessèchent et on a du mal à respirer. C'est souvent le cas en hiver, car l'air froid ne peut pas contenir beaucoup de vapeur d'eau. On le ressent quand on fait du ski ou des balades en raquettes, mais aussi dans les appartements surchauffés. Inversement, quand l'air est trop humide, la transpiration se fait mal et on a l'impression d'étouffer. C'est le cas dans les régions de climat équatorial. À Douala, au Cameroun, la température moyenne de l'air est de 26 °C, et le taux d'humidité reste toute l'année compris entre 80 et 99 % ! Dans le Sahara central, le taux d'humidité de l'air est de l'ordre de 5 à 20 % pendant les journées d'été. La nuit, l'air est très froid et la condensation de la vapeur d'eau est exploitée par les êtres vivants.

Dans quelles circonstances se produit la saturation ?

Nous avons déjà décrit l'évaporation et la condensation de l'eau en prenant pour exemple une tasse de café « fumante » et la buée dans la salle de bains. Dans le premier cas, de l'air chaud et humide se mélange à l'air ambiant plus froid, et la saturation a lieu. Dans la salle de bains, la vapeur se condense sur les parois parce qu'elles sont couvertes de minuscules poussières qui favorisent l'agrégation des molécules d'eau : ce sont des « noyaux de condensation ». Et si on voit la buée sur le miroir, c'est parce que la mince couche de microgouttelettes fait disparaître les reflets. Dans ce qui suit, nous examinons les phénomènes liés à la saturation de l'air dans l'atmosphère.

Qu'est-ce que le brouillard ?

Le brouillard est une masse d'air saturé en vapeur d'eau collée au sol, qui contient une multitude de microgouttelettes en suspension. On parle de *brouillard* quand la visibilité est inférieure à un kilomètre, et de *brume* lorsqu'elle est plus grande. Le brouillard peut se former de différentes façons.

Les effets du refroidissement nocturne : rosée, gelée blanche et brouillard

Le sol émet constamment de l'énergie vers l'espace sous forme de rayonnement infrarouge. Cette perte d'énergie est compensée *en moyenne* par l'apport du rayonnement du soleil et de l'atmosphère. Mais la nuit, la compensation n'a pas lieu et le sol *se refroidit*.

Imaginons une belle nuit d'automne, avec un ciel bien dégagé. Le sol et la couche d'air en contact avec lui se refroidissent progressivement. Si le refroidissement est suffisant, la saturation a lieu, et la vapeur d'eau se condense sous forme de gouttes d'eau sur les objets les plus froids, comme l'herbe : c'est la *rosée*. Si la température est négative, des cristaux de glace habillent les herbes et les brindilles : c'est la *gelée blanche*.

Reflets du soleil sur les gouttes de rosée et sur la gelée blanche.

Le ciel doit être dégagé parce que les gouttelettes d'eau des nuages absorbent le rayonnement infrarouge émis par le sol : les nuages se réchauffent et rayonnent de l'énergie vers le sol, qui se refroidit moins. Il faut aussi qu'il n'y ait pas ou peu de vent, car le brassage de l'air l'empêche de se refroidir. La rosée se forme quand la différence de température de l'air entre le jour et la nuit est grande, c'est-à-dire au printemps et en automne. Si l'air est assez froid, la saturation s'y produit aussi, et une nappe de brouillard se forme pendant la nuit.

Brouillard de rayonnement en décembre dans une vallée de Haute-Savoie.

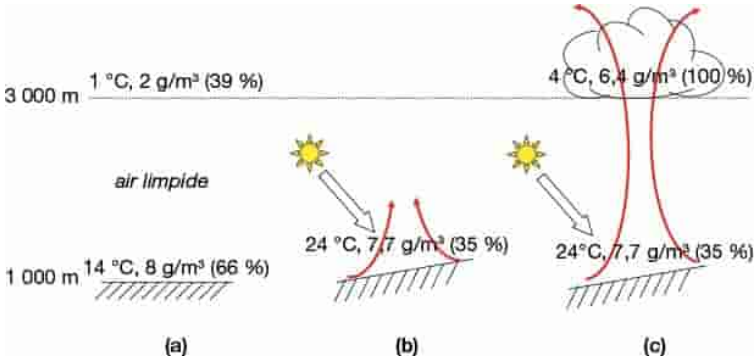
Dans la matinée, le soleil réchauffe le sol. Les gouttelettes d'eau en suspension dans l'air s'évaporent plus ou moins vite selon l'épaisseur et la température de la nappe, et finalement le ciel bleu apparaît. Ce type de brouillard, dit « de rayonnement », est donc signe de beau temps. Il se forme plutôt dans les endroits abrités et humides, comme les cuvettes et les fonds de vallée.

Le brouillard par déplacement d'air chaud et humide

Quand une masse d'air humide se déplace au-dessus d'un plan d'eau ou d'un sol nettement plus froid, elle peut se refroidir suffisamment par la base pour que la saturation ait lieu, et un brouillard apparaît. C'est ce qui se produit par exemple en hiver, quand de l'air marin tiède et humide est poussé par le vent vers la côte plus froide.

Comment se forment les nuages ?

Une masse d'air qui s'élève dans l'atmosphère se détend et se refroidit, et sa vapeur d'eau peut se condenser en formant un nuage. L'ascension peut être due à une ascendance thermique ou dynamique.



Évolution d'une masse d'air vers la formation d'un nuage.

La température, la masse volumique de la vapeur d'eau et le taux d'humidité de la masse d'air sont indiqués. Les calculs sont basés sur le modèle du gaz parfait.
(a) Air ambiant à 1 000 et à 3 000 m.
(b) Le soleil chauffe le sol qui chauffe lui-même l'air. Plus légère que l'air ambiant, une masse d'air s'élève sous l'effet de la poussée d'Archimède.
(c) En montant, la masse d'air se détend et se refroidit. Son évolution est représentée sur la figure de la page 160 par une flèche rouge. À 3 000 m, sa température atteint 4 °C et la saturation a lieu : un nuage apparaît.

Qu'est-ce qu'un « thermique » ?

Nous sommes en montagne à 1 000 mètres d'altitude, par une belle matinée de printemps. Au sol, l'air est frais, 14 °C, et la masse volumique de sa vapeur d'eau est égale à 8 g/m³, ce qui correspond à un taux d'humidité de 66 % (figure a ci-dessus). L'air est plus froid en altitude. Si la température diminue de 0,65 °C tous les 100 m comme dans le tableau de la page 153, elle est égale à 1 °C à 3 000 m. Les sources d'humidité étant au sol, l'air est plus sec en altitude : à 3 000 m, la masse volumique de la vapeur d'eau est, par exemple, de 2 g/m³, ce qui correspond à un taux d'humidité de 39 %. L'air n'étant saturé nulle part, l'atmosphère est limpide. Dans la matinée, le soleil chauffe les versants bien exposés et l'air à leur contact. Sur la figure b, on a supposé que la température atteignait 24 °C. L'air chauffé se dilate, ce qui fait baisser sa masse volumique et celle de la vapeur d'eau. Plus légère que l'air ambiant, une masse d'air s'élève sous l'effet de la poussée d'Archimède. Elle monte à une vitesse de quelques mètres par seconde, sans se mélanger à l'air ambiant. Elle s'élève dans de l'air dont la pression diminue : sa pression diminue également et son volume augmente, on dit qu'elle se *détend*. Cette détente refroidit la masse d'air d'environ un degré tous les 100 mètres.

Focus

Un gaz qui se détend se refroidit

Une bombe aérosol contient un gaz sous pression. Quand ce gaz

est mis en contact avec l'air ambiant, il se détend rapidement sans échanger de chaleur avec lui (on dit que la détente est *adiabatique*) et il *se refroidit*. Une masse d'air ascendante se détend aussi de façon adiabatique, mais beaucoup plus progressivement : sa température diminue de un degré environ tous les 100 mètres.

Le refroidissement est lent, mais plus rapide que les 0,65 °C par 100 m de l'air ambiant. L'évolution de la température et de la masse volumique de la vapeur d'eau pendant l'ascension est représentée par une flèche rouge sur la figure de la page 160. À une certaine altitude, la température de la masse d'air devrait devenir égale à celle de l'air ambiant. Sa masse volumique serait alors la même et la poussée d'Archimède s'annulerait. Mais il arrive souvent que la saturation ait lieu pendant l'ascension. Dans l'exemple de la figure page précédente, cela se produit à 3 000 m (figure c) : la température de la masse d'air atteint 4 °C, et la masse volumique de sa vapeur d'eau 6,4 grammes par mètre cube : l'air devient saturé (point D sur la figure de la page 160). Bien que plus froid, l'air ambiant n'est pas saturé à cette altitude parce qu'il est plus sec.

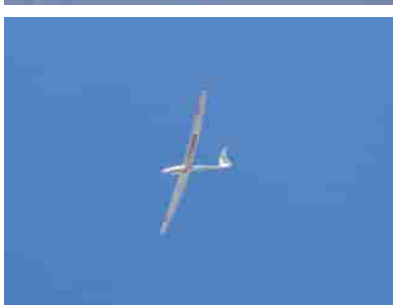
Ascendance thermique et condensation vers 2 100 m.

Dans une vallée, les conditions météorologiques sont à peu près partout les mêmes et la saturation s'y produit à la même altitude.

Nuages formés par ascendance thermique.

Les cumulus de beau temps s'alignent souvent au-dessus du relief.
Leur base est horizontale et ils se forment à peu près à la même altitude.

On a du mal à imaginer qu'une colonne d'air invisible s'élève en permanence vers la base de ces nuages, mais des spécialistes les recherchent et savent les exploiter (photos page suivante). On peut parfois « sentir » leur naissance : quand on descend en début d'après-midi sur un versant bien ensoleillé, on est souvent agréablement rafraîchi par une brise montante. Cette brise, c'est peut-être le démarrage d'une ascendance thermique.



Les amateurs de thermiques : vautour fauve, vélivoliste et parapentiste.

La vie des nuages d'origine thermique

Quand une masse d'air arrive à saturation, des gouttelettes se forment sur les « noyaux de condensation ». Ce sont de petites particules en suspension dans l'air comme les microcristaux de sel marin, les pollens, toutes sortes de poussières et même des bactéries, que l'on désigne sous le nom générique d'« aérosols ». La masse d'air venue du sol poursuit sa détente en montant, entraînant les gouttelettes et en produisant de nouvelles. Mais la condensation dégage de la chaleur, et la masse d'air se refroidit moins vite en montant, de 0,6 °C en moyenne tous les 100 m. Quand sa température devient négative, des microcristaux de glace se forment si l'atmosphère contient suffisamment de « noyaux de congélation ». Si ce n'est pas le cas, les gouttelettes subsistent dans un état de « surfusion » (voir second complément page 171). L'air saturé s'arrête de monter quand sa température devient égale à celle de l'air ambiant. L'extension verticale des nuages dépend donc beaucoup de la façon dont la température de l'air varie avec l'altitude. En fin de journée, le sol et l'air à son contact se refroidissent, les ascendances thermiques faiblissent, puis s'arrêtent. Le nuage, qui n'est plus alimenté en air humide, se mélange peu à peu à l'air ambiant plus sec et le ciel redevient limpide.

Les réacteurs des avions qui volent à haute altitude produisent beaucoup de vapeur d'eau et des particules qui favorisent la condensation. Ils laissent souvent derrière eux des *traînées* blanches faites de microscopiques cristaux de glace qui persistent longtemps si l'air est humide. Si ce dernier est très sec, les traînées disparaissent rapidement.

Les ascendances dynamiques

Par son brassage de l'air, le vent ne favorise pas le départ des « thermiques ». Mais quand il est soulevé par une montagne, il crée

lui-même une *ascendance dynamique*. Les phénomènes de détente et de refroidissement se produisent comme dans les ascendances thermiques, et la condensation peut avoir lieu.

Cumulus d'origine dynamique.

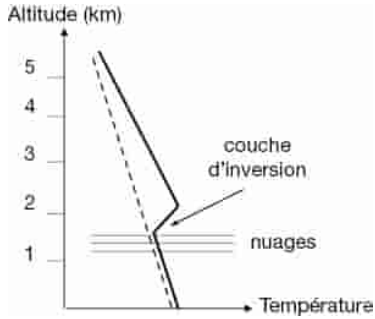
Une « vague de nuage » déferle au même endroit chaque fois qu'un vent fort souffle vers l'observateur.

En descendant sur l'autre versant, l'air se comprime et se réchauffe, et les gouttelettes s'évaporent. Quand l'atmosphère est stable, les vents d'altitude qui butent sur une barrière de montagnes peuvent engendrer un autre phénomène : les couches d'air soulevées par le relief retombent de l'autre côté, et leur élasticité les fait osciller verticalement, un peu comme une 2CV qui franchit trop vite un ralentisseur. Ces ondulations de l'air sont, bien sûr, invisibles. Mais si l'air est assez humide, elles se matérialisent par des nuages « lenticulaires » qui se forment au sommet des ondulations où l'air se détend et se refroidit (photo page suivante).

Empilements de nuages lenticulaires formés par des vents forts qui soufflent sur les reliefs.

Qu'est-ce qu'une inversion de température ?

Habituellement, la température de l'air diminue quand l'altitude augmente, ce qui favorise l'ascension des masses d'air chauffées par le sol. Mais la situation inverse peut se produire : au-dessus d'une certaine altitude, la température cesse de diminuer et même elle *augmente*. C'est ce qu'on appelle une « inversion de température ». C'est, bien sûr, un abus de langage : ce n'est pas la température qui est inversée, mais la façon dont elle varie avec l'altitude. Une telle inversion a lieu près du sol lors du refroidissement nocturne, mais elle dure généralement peu de temps. Des inversions plus durables se produisent dans les situations « anticycloniques », où l'air qui descend de la partie supérieure de la troposphère s'étale sur une grande région, à l'échelle de la France par exemple. En descendant, cet air se comprime et se réchauffe : au-dessus d'une certaine altitude, de l'ordre de 1 000 à 2 000 mètres, les éventuelles gouttelettes d'eau s'évaporent et l'air est limpide. La transition avec l'air des couches inférieures, dont la température varie normalement avec l'altitude, se fait au niveau de la « couche d'inversion » (figure page suivante).



Inversion de température.

Les tirets correspondent à la diminution de température de 6,5 °C tous les 1 000 mètres. Les traits continus représentent la variation de température en présence d'une inversion. Les nuages, *stratus* ou *stratocumulus*, sont bloqués sous la « couche d'inversion ».

Les masses d'air qui montent du sol rencontrent cette couche où la masse volumique de l'air est plus faible : la poussée d'Archimède disparaît et elles restent bloquées. Si elles sont saturées en vapeur d'eau, un nuage s'étale horizontalement. En montagne, d'immenses mers de nuages couvrent parfois les vallées en automne et en hiver. L'absence de soleil se fait sentir en dessous, mais au-dessus il fait beau et les skieurs se régalent dans la poudreuse.

Une mer de stratocumulus sur le Champsaur (Hautes-Alpes).

Elle s'est formée en novembre après plusieurs jours de pluie dans la vallée, de neige sur les sommets. Elle s'évapore en glissant vers la cuvette de Gap où l'air est moins froid.

En plaine, l'inversion de température favorise la formation de brouillard de rayonnement et de nappes de nuages bas, les *stratus*. Les météorologistes parlent alors de « grisaille ». Dans les grandes villes, les fumées produites par les usines et le chauffage urbain sont bloquées sous la couche d'inversion, et la pollution de l'air augmente. C'est le *smog* des Anglais, contraction de *smoke* et de *fog*. En été, les situations anticycloniques produisent aussi des inversions de

température, mais l'air des basses couches est plus chaud et se sature moins facilement.

Compléments

www.lienmini.fr/39798-cpltsP169

Pression de vapeur saturante et température d'ébullition de l'eau
Qu'est-ce que la surfusion ?

Les précipitations

Un petit coup au carreau, comme si quelque chose l'avait heurté, suivi d'une ample chute légère comme de grains de sable qu'on eût laissés tomber d'une fenêtre au-dessus, puis la chute s'étendant, se réglant, adoptant un rythme, devenant fluide, sonore, musicale, innombrable, universelle : c'était la pluie.

Marcel Proust, Du côté de chez Swann

L'atmosphère terrestre contient beaucoup de vapeur d'eau. Dans les nuages, l'eau est aussi présente sous forme d'une multitude de gouttelettes et de microcristaux de glace en suspension dans l'air. Pourquoi les précipitations ne tombent-elles que de certains nuages? Et qu'est-ce qui détermine leur nature ? C'est à ces questions que ce chapitre tentera de répondre.

Au fond, qu'est-ce qu'un nuage ?

Vus du sol, les nuages nous apparaissent comme des masses blanches qui flottent dans le ciel. Certains se forment sur place pendant la journée, d'autres défilent lentement en nappes faites de rides ou de balles, et les plus élevés peinent à masquer le soleil de leurs voiles et de leurs filaments. La forme des nuages varie constamment. Les protubérances qui se font et se défont nous fascinent, et notre imagination se plaît à y retrouver des formes familières.

Des nuages à tous les étages.

Des cumulus formés localement par ascendance thermique coiffent un sommet à 2 800 m. À haute altitude, de fins cirrus annoncent l'arrivée d'une perturbation.

Mais aussi…

La rêverie des nuages.

« Ethel avait l'impression de flotter dans le ciel. C'étaient les nuages qu'elle aimait. Couchée dans le sable des dunes, elle les regardait filer à toute vitesse, légers, libres […]. Ils glissaient, pas très haut, en petites boules blanches qui parfois se heurtaient, s'unissaient, se divisaient. Il y en avait de fous, qui couraient plus vite que les autres, s'effilochaient en pelotes cotonneuses, en graines de pissenlit, en plumeaux de roseaux. »

J.M.G. Le Clézio, *Ritournelle de la faim*

Diversité des nuages

Au début du XIXe siècle, un pharmacien anglais, Luke Howard, s'est inspiré de la classification des êtres vivants de Linné pour donner aux nuages un nom latin basé sur leur aspect : *cirrus* « filaments », *cumulus* « amas », *stratus* « couche étendue ». À ces noms génériques, éventuellement composés, il ajouta un qualificatif : *nimbus* quand le nuage était susceptible de donner des précipitations, *alto* pour préciser son altitude. Il obtint ainsi dix genres de nuages qu'il est commode de ranger en fonction de *l'altitude de leur base* :

- de 6 000 à 8 000 m : *cirrus*, *cirrocumulus*, *cirrostratus* ;
- de 2 500 à 6 000 m : *altocumulus*, *altostratus* ;
- de 300 à 2 000 m : *nimbostratus*, *stratocumulus*, *stratus*, *cumulus*, *cumulonimbus*.

Cette classification est toujours en vigueur, mais elle a été enrichie : chaque genre a été divisé en espèces et chaque espèce en variétés dont on trouve la description détaillée dans les ouvrages spécialisés.

La vraie nature des nuages

Quand nous sommes assis dans un avion qui traverse une masse nuageuse, les trépidations de la carlingue et la vision à travers le hublot nous révèlent un monde turbulent bien différent du spectacle paisible vu du sol. Un nuage est la *partie visible* d'un flux d'air ascendant, et ce que nous voyons, ce sont les gouttelettes et les microcristaux de glace qui se condensent là où l'air est saturé. Quand l'atmosphère est stable, l'ascension s'arrête rapidement et le nuage s'étale. Quand elle est instable, l'air saturé continue de monter et les échanges de chaleur dus à la condensation créent des turbulences. La vitesse d'ascension n'est pas uniforme, et des protubérances en « chou-fleur » apparaissent. Les gouttelettes s'évaporent à la surface du nuage, mais d'autres les remplacent tant que la condensation a lieu.

On voit souvent défiler des nappes de nuages dans lesquelles des zones de condensation, matérialisées par des boules blanches ou des rides, alternent avec d'autres où l'air est plus clair, parfois même limpide. Ce sont des *altocumulus*.

Les étonnantes structures des altocumulus.

Ces structures sont dues à des ondulations verticales de l'air, à une ou deux dimensions : l'air se détend, se refroidit et se sature dans les parties ascendantes, et il se comprime, se réchauffe et redevient limpide dans les parties descendantes.

Quelle est l'origine des précipitations ?

Les nuages peuvent contenir beaucoup d'eau

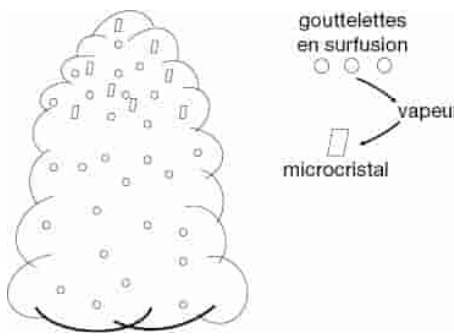
Dans un nuage, l'eau est présente sous forme de vapeur, de gouttelettes et de microcristaux de glace. L'air étant saturé, la courbe de saturation de la figure page 160 permet d'évaluer la masse de vapeur d'eau qu'il contient quand on connaît sa température. Reprenons l'exemple de la figure c page 164. À la base du nuage, à 3 000 m, la température de la masse d'air est de 4 °C, et un mètre cube d'air contient 6,4 g de vapeur. La température diminuant de 0,6 °C tous les 100 mètres, elle atteint – 2 °C à 4 000 m, et un mètre cube d'air y contient 4,2 g de vapeur. Dans ce nuage, une colonne d'air de base 1 m^2 contient donc environ 5 kg de vapeur d'eau entre 3 000 et 4 000 mètres. Si on ajoute la masse des gouttelettes formées par condensation, environ 4 grammes d'eau par mètre cube pour un gros cumulus, on trouve que cette colonne de 1 000 mètres contient environ 9 kg d'eau. Si toute cette eau tombait sur le sol, chaque mètre carré recevrait 9 litres d'eau, une quantité largement suffisante pour arroser les salades et les fraisiers. Les nuages très épais contiennent donc beaucoup d'eau.

L'effet Bergeron et la coalescence

Dans quelles circonstances l'eau des nuages se met-elle à tomber ? Pour répondre à cette question, il faut comprendre comment les microgouttelettes des nuages, dont le diamètre moyen est de

20 microns, peuvent se transformer en gouttes de pluie d'un diamètre moyen de 2 mm, sachant que ce facteur 100 en *diamètre* correspond à un facteur 1 000 000 en *volume*. Certains nuages, comme les cumulus de beau temps et les fins nuages de la famille des cirrus, ne donnent jamais de précipitations. Les « nuages de pluie » sont habituellement gros et *sombres*, ce qui signifie qu'ils ont une grande extension verticale. On pourrait imaginer que durant leur longue chute à travers ces nuages, les gouttelettes capturent d'autres gouttelettes et grossissent par coalescence jusqu'à donner des gouttes de pluie. Mais les gouttelettes en suspension dans les nuages ont plutôt tendance à monter qu'à descendre, et la capture d'un million de gouttelettes paraît bien improbable. La coalescence est certainement nécessaire, mais elle ne s'applique pas aux gouttelettes.

Dans les nuages de grande extension verticale, la température de la partie supérieure est très basse. Des microcristaux de glace y coexistent avec des gouttelettes d'eau en *surfusion* qui ne gèlent pas faute de « noyaux de congélation » (voir second complément page 171). En 1935, un météorologiste suédois, Tor Bergeron, a montré que dans ces conditions, les gouttelettes « surfondues » avaient tendance à s'*évaporer* et que la vapeur se transformait en glace au contact des microcristaux : les cristaux grossissent au détriment des gouttelettes.



Formation des précipitations par « effet Bergeron ».

Quand la température de la partie supérieure du nuage est inférieure à – 7 °C environ, des gouttelettes en surfusion y coexistent avec des microcristaux de glace. Ceux-ci grossissent au détriment des gouttelettes et peuvent alors tomber.

Quand les microcristaux sont assez gros, leur poids les fait tomber. En traversant le nuage, ils capturent d'autres cristaux et d'autres gouttelettes surfondues qui gèlent à leur contact. Des ramifications se forment : un flocon de neige est né ! Les ramifications dépendent beaucoup des conditions locales de température et d'humidité, mais aussi de la direction de l'air, ce qui explique la grande diversité d'aspect des flocons.

Il neige, il pleut ou il grêle. Le diamètre du gros grêlon est de 2 cm.

Des précipitations variées

Les flocons qui tombent sous les nuages rencontrent de l'air de moins en moins froid. Si la température de l'air reste négative jusqu'au sol, les flocons l'atteignent et le recouvrent d'un beau manteau blanc. C'est ce qui se passe toute l'année sur les très hauts sommets, où la température est toujours négative. Sinon, ils fondent pendant leur chute et il pleut. Quand le nuage est très épais et l'air turbulent, les flocons mettent longtemps à sortir, et la coalescence produit de gros flocons et donc de grosses gouttes. Les nuages moins épais où l'air est plus calme, comme les stratus, donnent des gouttes plus petites. On parle de *bruine* quand leur diamètre est compris entre 0,1 et 0,5 mm, et de *pluie* quand il est supérieur à 1 mm. Les gouttes de pluie dépassent rarement quelques millimètres de diamètre : quand elles sont plus grosses, elles s'aplatissent et éclatent pendant leur chute. Si l'air est trop chaud sous le nuage, des traînées d'eau commencent à

tomber et s'évaporent avant d'atteindre le sol. Ce phénomène, assez fréquent et bien visible, s'appelle une « virga ». Inversement, il arrive que les gouttes de pluie traversent de l'air froid : elles passent à l'état de surfusion et gèlent instantanément au contact du sol : ce sont les *pluies verglaçantes*. En hiver, on entend dire parfois qu'il fait trop froid pour qu'il neige. Les nuages ne donnent des précipitations que s'ils contiennent suffisamment de *gouttelettes en surfusion*, ce qui n'est pas le cas si l'air est très froid. Mais il y a une autre raison à cela : quand il fait très froid en hiver, c'est généralement parce qu'une masse d'air venue de Sibérie s'étale sur l'Europe occidentale. Cet air est sec, ce qui ne favorise pas la formation de nuages. C'est pour la même raison qu'il neige très peu sur l'Antarctique, que l'on appelle parfois « le désert blanc ».

© Getty Images

Virga.

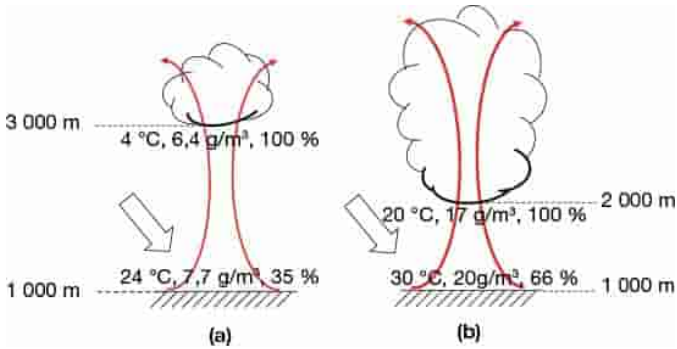
Comment naissent et évoluent les orages ?

Les nuages « gonflent » parfois en hauteur et en épaisseur jusqu'à devenir de gigantesques *cumulonimbus* qui donnent de fortes précipitations et génèrent des phénomènes électriques spectaculaires.

La formation des cumulonimbus

Reprenons l'exemple de la figure c de la page 164 qui est rappelé sur la figure a de la page suivante : une masse d'air d'une température de 24 °C au sol, monte et se refroidit par détente. Sa température atteint 4 °C à 3 000 m, la saturation a lieu et un cumulus apparaît. Examinons les conditions qui seraient nécessaires pour que ce cumulus se forme à plus basse altitude et monte très haut. Dans la situation de la figure a, le taux d'humidité de la masse d'air au sol est égal à 35 %.

Cet air est très sec. Pour arriver à la saturation, il doit se refroidir beaucoup et donc monter très haut. S'il était plus humide au départ, il se saturerait à plus basse altitude. Par exemple, s'il partait du sol avec une température de 30 °C et un taux d'humidité de 66 %, la saturation aurait lieu quand sa température atteint 20 °C, c'est-à-dire à 2 000 m (figure b).



Influence de l'humidité de l'air sur la croissance des cumulus.

(a) Air sec : la saturation a lieu à une altitude élevée.
(b) Air humide : la saturation a lieu à basse altitude.

Dans le nuage, l'air saturé monte en se refroidissant, et il s'arrête quand sa température devient égale à celle de l'air ambiant. Il monte donc d'autant plus haut que l'air ambiant est froid en altitude. Mais il ne peut tout de même pas monter indéfiniment : au-dessus de 11 km environ, la température de l'air cesse de diminuer, puis *augmente* avec l'altitude. Cette *inversion de température* à l'échelle de la Terre définit le passage de la troposphère à la stratosphère : la *tropopause*. Elle impose une limite supérieure aux nuages, qui est d'ailleurs souvent atteinte par les cumulonimbus. En grandissant, les cumulus aspirent davantage d'air au sol et il arrive un moment où ils prélèvent l'air qui alimente les nuages voisins plus modestes. Les gros cumulus « asphyxient » ceux qui les entourent et finissent par devenir d'énormes nuages bourgeonnants.

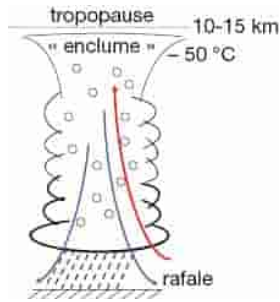
Développement des cumulus.

Les deux photos ont été prises à peu près au même endroit et dans la même direction, à quatre heures d'intervalle.

La croissance des cumulus est donc amplifiée quand l'air des couches inférieures est chaud et humide, et l'air en altitude particulièrement froid. Dans nos régions, ces conditions sont plutôt réunies au printemps et en été : après plusieurs jours (et nuits) de chaleur humide, l'air au sol est presque saturé de vapeur d'eau et les lointains sont brumeux : on dit que le temps est « lourd ». Dans la journée, des cumulus se développent sur plusieurs milliers de mètres de hauteur et de largeur. L'après-midi ou en début de soirée, de grosses gouttes de pluie se forment et les averses se déclenchent. Si les cumulus évoluent jusqu'au stade du cumulonimbus, un orage éclate. Mais il est très difficile de savoir exactement où vont se former les cumulonimbus, et les météorologistes préfèrent parler de « situation orageuse ».

Vie et mort des cumulonimbus

Les cumulonimbus sont de gigantesques aspirateurs où l'air peut monter à 30 m/s. Les fortes turbulences accélèrent le grossissement des cristaux de glace par coalescence. En tombant, ils entraînent un flux d'air froid qui génère au sol une rafale de vent.



Le cumulonimbus.

À gauche : représentation simplifiée des flux montants et descendants.
À droite : formation de « l'enclume » au sommet.

Il s'ensuit de fortes averses de grosses gouttes de pluie ou de *grésil*, des petites particules de glice translucides. Si les courants ascendants sont assez forts, ils soulèvent ces particules vers la partie supérieure du nuage, d'où elles retombent en capturant de nouvelles gouttelettes surfondues. En se répétant, ce processus génère des grêlons qui finissent par arriver au sol. Ces derniers sont parfois énormes ; le record est de 17 cm de diamètre !

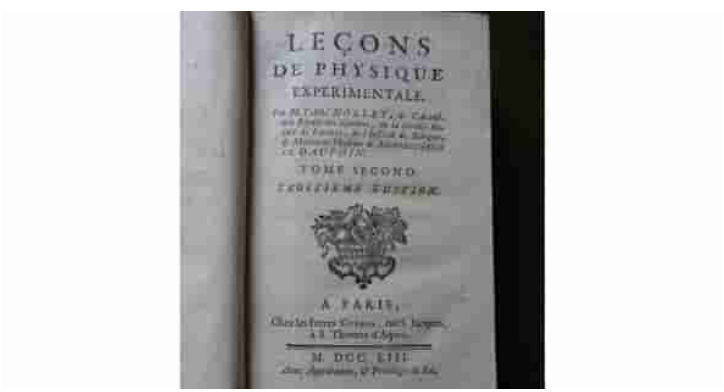
Toutes ces précipitations refroidissent le sol, et les ascendances faiblissent. L'alimentation en vapeur d'eau du nuage diminue rapidement et les précipitations s'arrêtent. Le sommet du cumulonimbus s'étale en formant une « enclume » de microcristaux de glace, et le nuage se désagrège peu à peu. Les nuages formés localement donnent donc généralement des averses et des chutes de grêle de courte durée. Mais dans des conditions de forte instabilité, les cumulonimbus peuvent se régénérer et des averses violentes se succèdent.

La foudre : une gigantesque étincelle électrique

Au XVIIIe siècle, la mode des « salons de physique », où des savants faisaient des expériences scientifiques en public, se répandit en Europe. On y faisait des étincelles avec la « machine électrique », un globe de verre en rotation rapide sur lequel frottait un coussinet en cuir ou les mains d'un assistant (voir le premier complément page 186). On produisait même des arcs électriques en accumulant l'électricité dans des bouteilles de Leyde, des sortes de condensateurs. Mais la nature même du « fluide électrique » restait un mystère.

En 1748, un expérimentateur de talent, l'abbé Nollet, décrivit dans ses *Leçons de physique expérimentale* les similitudes entre les effets de la foudre et les étincelles. Le mémoire *Expériences et observations sur l'électricité* de Benjamin Franklin parut quatre ans plus tard à Paris. Le

physicien de Philadelphie y détaillait les similitudes entre la foudre et les phénomènes électriques sans citer Nollet, et il proposait de démontrer leur identité en utilisant le « pouvoir des pointes ». Une tige métallique verticale devait être dressée sur un édifice, et une personne qui tenait un fil de fer relié au sol avec une matière isolante devait le pointer vers la tige pendant l'orage. Quand la foudre tomberait sur la tige, une étincelle semblable à celle générée par les machines électriques devait jaillir entre les conducteurs métalliques. L'expérience fut réalisée en France en 1752 à la demande de Buffon, et elle réussit parfaitement. Franklin voulut vérifier lui-même. Un jour d'orage, il fit voler un cerf-volant retenu par une corde de chanvre. Le chanvre humide étant légèrement conducteur, des étincelles apparaissaient quand il approchait une clef métallique de la corde. S'il avait utilisé un fil métallique au lieu d'une corde, il aurait certainement été électrocuté. Il proposa par la suite de protéger les bâtiments en installant sur leur toit une tige métallique reliée au sol par un bon conducteur : un paratonnerre. Il faut noter que la description du « fluide électrique » que donne Franklin dans son mémoire est assez proche de nos conceptions modernes.


LEÇONS
DE PHYSIQUE
EXPÉRIMENTALE,
TOME SECOND
A PARIS,
M. DCC. LIII.

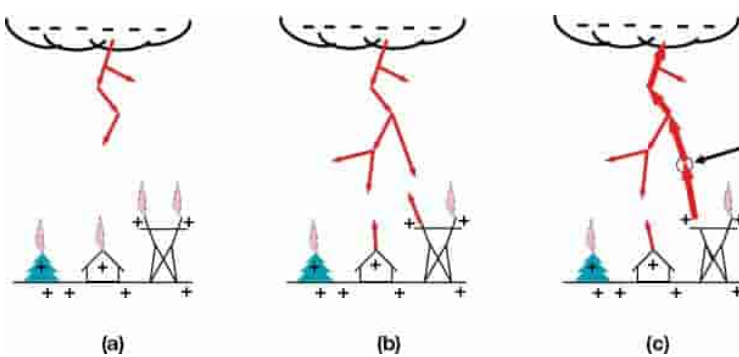
Le tome II des *Leçons de physique expérimentale* de l'abbé Nollet.

Qu'est-ce qu'une étincelle électrique ? L'air est un excellent *isolant* électrique. Mais quand deux conducteurs entre lesquels il existe une grande différence de potentiel sont séparés par une faible épaisseur d'air, les molécules de l'air sont dissociées en atomes ionisés. L'air devient localement un *plasma* qui conduit l'électricité. Les atomes passent dans un état excité, ils se désexcitent en émettant un flash lumineux et le canal conducteur se dilate brusquement : c'est le claquement. La différence de potentiel nécessaire dépend de l'épaisseur d'air : ce qui importe, c'est le *champ électrique*, c'est-à-dire le rapport entre la différence de potentiel et l'épaisseur. À la pression normale, l'air sec devient conducteur quand le champ électrique

dépasse environ 30 kV/cm. Mais il suffit de 10 kV/cm quand l'air est humide ou quand la pression est plus faible.

Les cumulonimbus : d'énormes machines électrostatiques

Dans les cumulonimbus, les turbulences de l'air sont telles que les *frottements* entre les cristaux de glace, les particules de grésil, les grêlons et les gouttelettes d'eau, créent une *séparation de charge* : les microcristaux de glace de la partie supérieure se chargent positivement, et les gouttelettes de la partie inférieure négativement. Cette distribution de charges crée un champ électrique à l'intérieur du nuage, mais aussi sous le nuage et jusqu'au sol, où il atteint environ 150 V/cm. Mais il peut prendre des valeurs beaucoup plus grandes sur les objets conducteurs et pointus : c'est « l'effet de pointe ». Quand le champ électrique dépasse les 10 à 30 kV/cm nécessaires pour ioniser l'air, des filaments mauves qui se tortillent, les *effluves*, apparaissent. Sur les mâts des navires, ce sont les « feux de Saint-Elme ». Les effluves émettent des bourdonnements semblables à ceux que l'on entend sous les lignes à très haute tension. Pour les alpinistes, ces « abeilles » sont un signal d'alarme : la foudre peut tomber à tout moment. Venons-en au coup de foudre proprement dit. Une petite décharge, un « traceur », descend de la base du nuage et progresse par bonds successifs vers le sol en se ramifiant (figure a page suivante). Quand une ramification approche du sol, elle y crée un champ électrique intense, et les effluves proches se transforment en *traceurs ascendants* (figure b). Quand l'un d'eux rencontre un traceur descendant, le court-circuit crée un canal conducteur entre le sol et le nuage. Des charges positives du sol y remontent à la vitesse de 100 000 km/s : c'est l'arc en retour, le coup de foudre proprement dit (figure c).



Les différentes étapes menant au coup de foudre.

a) Le champ électrique au sol produit des effluves Un traceur descendant part du nuage.
b) Des traceurs ascendants partent des effluves vers le traceur descendant.
c) La jonction de traceurs descendants et ascendants crée un canal conducteur qui déclenche l'arc en retour.

La température du canal monte brusquement à 20 000 °C : l'air émet une lumière intense, l'éclair, et sa dilatation brutale crée une onde de choc, le tonnerre.

Photos Paul Marquis

Coups de foudre.

À gauche, depuis Rabou, aux environs de Gap (8 août 2018).
À droite, en plein centre de Gap (22 août 2018).

Mais aussi…

Les feux de Saint-Elme dans *Moby Dick*

« Les extrémités des vergues étaient entourées d'un feu pâle ; et, touchés au sommet de chaque paratonnerre à triple pointes par les blanches flammes effilées, les trois grands mâts brûlaient silencieusement dans l'air sulfureux, comme trois cierges gigantesques devant un autel. »

Les arcs qui se succèdent rapidement illuminent le fond noir des nuages. La lumière de l'éclair se propage à 300 000 km/s alors que le tonnerre progresse à la vitesse du son, environ 330 m/s. Ce décalage d'un kilomètre toutes les trois secondes permet d'évaluer la distance du coup de foudre et de suivre la progression de l'orage. L'intensité du courant dans le canal peut atteindre 30 000 ampères. Le coup de foudre dégage une énorme quantité d'énergie qu'il est impossible de récupérer, puisqu'on ne sait même pas où il va tomber ! Dans le

roman de Mary Shelley et au cinéma, le savant Frankenstein arrive à utiliser la foudre pour donner vie à sa créature. Mais le résultat n'est pas très probant…

Mais aussi…

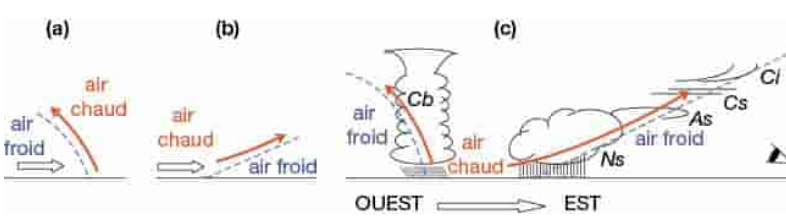
L'orage vu par Georges Brassens

« Par un soir de novembre, à cheval sur les toits,
Un vrai tonnerr' de Brest, avec des cris d'putois,
Allumait ses feux d'artifice.
Bondissant de sa couche en costume de nuit
Ma voisine affolé' vint cogner à mon huis
En réclamant mes bons offices. »

Que se passe-t-il au passage d'une perturbation atmosphérique ?

Quand une masse d'air qui se déplace horizontalement rencontre une autre masse d'air plus chaud, donc plus léger, elle s'enfonce comme un coin et la soulève. Le soulèvement est brutal et l'ascendance rapide (figure a page suivante). Si elle rencontre une masse d'air plus froid, donc plus dense, elle glisse par-dessus et s'élève progressivement (figure b).

Ces ascendances, qui peuvent produire des nuages, ont lieu à grande échelle dans les « perturbations atmosphériques », où d'énormes masses d'air de températures et d'humidités différentes s'affrontent. Celles qui circulent le plus souvent dans nos régions se forment au-dessus de l'océan Atlantique et se déplacent à peu près d'ouest en est. Les ascendances qui en résultent sont représentées schématiquement sur la figure c. On retrouve à l'avant la situation de la figure b.



Ascendances créées par l'affrontement de masses d'air de températures différentes.

Leurs contacts sont en pointillé. Les flèches rouges montrent les ascendances de l'air chaud.
Ci, cirrus ; *Cs*, cirrostratus ; *As*, altostratus ; *Ns*, nimbostratus ; *Cb*, cumulonimbus.

Elle conduit à la formation de nuages dont la nature varie en fonction de l'altitude et des caractéristiques de l'air. L'observateur aperçoit des cirrus, des nuages fins et élevés qui constituent l'avant-garde du cortège nuageux. Arrivent ensuite des nuages d'altitude moyenne, puis les nimbostratus qui apportent la pluie.

En plaine, il est difficile de se rendre compte que l'altitude des nuages diminue. En montagne, on voit d'abord les plus hauts sommets « accrocher » les nuages. Le « plafond » descend peu à peu et les précipitations commencent. Mais l'histoire n'est pas terminée. Après une période relativement calme, l'arrière de la perturbation arrive. Les masses d'air sont alors dans la situation de la figure a ci-dessus. Les ascendances brutales déclenchent la formation de gros cumulus et souvent de cumulonimbus qui défilent en donnant des averses et des orages. Ces perturbations mettent environ un jour pour traverser notre pays, mais elles font parfois du surplace. Elles se déforment en progressant, et la succession des événements n'est pas la même selon que l'on est sur la trajectoire ou en marge. Le passage de la perturbation s'accompagne aussi de variations de pression et de changements de direction du vent.

Compléments

www.lienmini.fr/39798-cpltsP184

Faire des étincelles : du silex à l'allume-gaz piézo-électrique
L'effet de foehn

Les échanges de chaleur et l'effet de serre de l'atmosphère

Le soleil, avec toutes ces planètes qui gravitent sous sa gouverne, prend encore le temps de mûrir une grappe de raisins, comme s'il n'y avait rien de plus important.

Galilée, Dialogues sur les deux grands systèmes du monde

La présence d'une atmosphère autour d'une planète a pour effet de faire monter la température moyenne de sa surface et d'atténuer les contrastes thermiques. La planète la plus proche du Soleil, Mercure, est aussi la plus petite. Elle n'a pas retenu d'atmosphère, et la température de sa surface varie entre 400 °C le jour et – 170 °C la nuit. Vénus a pratiquement la même dimension que la Terre. Son épaisse atmosphère, constituée essentiellement de CO_2, crée au sol une pression de 92 bars. La température du sol reste comprise entre 490 °C le jour et 450 °C la nuit. Nous arrivons à la Terre : sa distance au Soleil et son atmosphère sont responsables du climat modéré et favorable à la vie que nous connaissons. Les caractéristiques de la Lune sont semblables à celles de Mercure : absence d'atmosphère et température comprise entre 120 °C et – 180 °C. Mars est nettement plus petite que la Terre. Son atmosphère, constituée surtout de CO_2, est très ténue. La température y varie entre 20 °C le jour et – 100 °C la nuit.

L'énergie qu'une planète reçoit du Soleil est absorbée en grande partie par sa surface et par son atmosphère, dans des proportions qui sont déterminées par leurs échanges de chaleur. Nous décrivons dans ce chapitre les mécanismes de ces échanges, et nous montrons comment l'analyse du bilan thermique de la Terre met en évidence « l'effet de serre » de son atmosphère.

Qu’est-ce que la chaleur et comment s’échange-t-elle ?

Énergie thermique et température

Imaginons un gaz d’atomes dans un récipient. Les déplacements aléatoires des atomes qui se heurtent entre eux et contre les parois constituent l’*agitation thermique*. Ces atomes possèdent une *énergie cinétique* due à leur vitesse. Celle-ci diffère selon les atomes et elle varie constamment sous l’effet des chocs. Mais à l’équilibre, la distribution des vitesses ne change pas, et la somme des énergies cinétiques des atomes est constante : c’est l’*énergie thermique* du gaz. La température absolue du gaz, exprimée en kelvins (voir l’Appendice page 334), est proportionnelle à l’*énergie cinétique moyenne* d’un atome. Ces notions sont très générales : l’énergie thermique et la température des gaz, des liquides et des solides sont déterminées par les *mouvements désordonnés* de leurs constituants microscopiques.

Transferts thermiques et chaleur

Un transfert d’énergie thermique peut avoir lieu spontanément d’un corps vers un autre dont la température est plus basse. L’énergie thermique du premier diminue, celle du second augmente, et le transfert cesse quand les températures des deux corps sont égales. Ces transferts d’énergie thermique, que l’on appelle aussi des échanges de *chaleur*, peuvent s’effectuer de plusieurs façons :

Par conduction

Le cas typique est celui du contact entre deux corps solides de températures différentes. Les collisions entre les constituants microscopiques des deux corps dans la zone de contact produisent un transfert d’énergie cinétique vers celui dont la température est la plus basse.

Par convection

Quand la surface d’un solide ou d’un liquide est en contact avec un fluide, un échange de chaleur a lieu par conduction avec la couche de fluide. Celle-ci se déplace et elle est remplacée par une nouvelle couche.

Par rayonnement

Lors de leurs collisions, les atomes et les molécules d’un corps peuvent acquérir assez d’énergie pour passer dans un état excité. La désexcitation s’accompagne de l’émission d’un rayonnement électromagnétique qui peut être absorbé par un autre corps, ce qui accroît son agitation thermique et sa température.

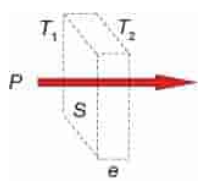
Dans ce qui suit, ces mécanismes sont décrits de façon plus quantitative et ils sont illustrés par de nombreux exemples. D'après ce qui précède, la *chaleur* est la forme d'énergie qui fait varier l'énergie thermique des corps. Mais alors, qu'est-ce que le *froid* ? La réponse est simple : le froid n'existe pas ! Il n'y a pas de « transfert de froid » de A vers B, il n'y a qu'un défaut de transfert de chaleur de B vers A. Cela n'empêche pas d'avoir froid ni de refroidir la soupe en soufflant dessus…

Qu'est-ce qu'un bon conducteur de chaleur ?

Toutes les substances matérielles conduisent la chaleur, mais avec des efficacités très variables. La première expérience dans ce domaine remonte à la prime enfance, et elle fut souvent douloureuse : le contact d'une casserole, d'une plaque chauffante, d'un fer à repasser ou de l'eau brûlante du robinet. On apprend par la suite que l'on peut manipuler les objets très chauds s'ils sont séparés de la peau par une matière isolante : la poignée en bois ou en matière plastique d'une casserole, une manique en tissu pour retirer un plat du four.

Au début du XIXe siècle, Joseph Fourier a montré comment on pouvait caractériser la capacité d'un matériau à conduire la chaleur (figure page suivante) : si les deux faces d'un élément de surface S et d'épaisseur e sont maintenues aux températures T_1 et T_2, la puissance thermique qui le traverse s'écrit :

$$P = \lambda\, (T_1 - T_2)\, S/e$$



Définition de la conductivité thermique d'un matériau. On suppose $T_1 > T_2$.

P s'exprime en watts, S en mètres carrés, e en mètres et les températures en kelvins (K). λ est la *conductivité thermique* du matériau qui s'exprime en W m^{-1} K^{-1}.

Les bons conducteurs thermiques

Les substances qui conduisent le mieux la chaleur sont les métaux, mais leur conductivité est très variable. On les utilise pour la cuisson et dans les chaudières domestiques et industrielles.

Conductivité thermique des métaux à 20 °C (en W $m^{-1}K^{-1}$).

Les isolants thermiques

Le vide ne conduit pas la chaleur. L'air, et les gaz en général, la conduisent très mal. L'air est le meilleur isolant thermique, et toutes les matières qui le piègent sont de bons isolants : les plumes des édredons et des duvets, mais aussi la laine et les textiles.

Conductivité thermique de divers isolants thermiques à 20 °C (en W $m^{-1}K^{-1}$).

On piège de l'air quand on s'habille en superposant plusieurs vêtements. En isolation thermique des bâtiments, on utilise beaucoup la laine de verre et la laine de roche sur un support en papier. La neige, faite d'air et de microcristaux de glace, est un excellent isolant. En montagne, les jardiniers attendent avec impatience la neige qui protégera leurs fleurs et leurs légumes. Le dépôt d'une bonne couche de neige sur un lac gelé arrête la croissance de la glace en profondeur.

Le lac de la photo de gauche de la page 143, en hiver.

Autres matières

Les matériaux employés traditionnellement pour la construction comme la terre, le bois, la pierre ou le béton, ne sont pas de bons isolants thermiques. On privilégie actuellement les matériaux qui contiennent beaucoup d'air comme les bétons « cellulaires » ($\lambda \approx 0{,}1$ W $m^{-1}K^{-1}$) et la paille ($\lambda \approx 0{,}05$ W $m^{-1}K^{-1}$). La terre n'est pas un bon isolant, mais sa conductivité devient semblable à celle du béton cellulaire quand elle est associée à la paille.

Conductivité thermique de divers matériaux à 20 °C (en W $m^{-1}K^{-1}$).

© Getty Images

Maison en paille à ossature bois.

Notre peau n'est pas un thermomètre

Dans une pièce, tous les objets sont à la même température, à l'exception des appareils de chauffage et d'éclairage. Pourtant, les objets métalliques nous paraissent plus froids au toucher que ceux qui sont en bois. L'exemple le plus « frappant » est celui d'un marteau dont la tête est en fer et le manche en bois. Quand on marche pieds nus sur un plancher carrelé, on ressent une impression de froid qui disparaît sur les parties couvertes d'un tapis et sur les parquets. Quelle est l'origine de ces différences ?

La température de notre peau, 35 °C environ, est supérieure à celle des objets que nous touchons. À leur contact, un transfert de chaleur a lieu par conduction de la peau vers l'objet. Mais la puissance transférée dépend des *conductivités thermiques* de la peau et de l'objet. Prenons l'exemple des objets en fer et en bois, les uns et les autres à 20 °C. La conductivité thermique de la peau est pratiquement celle de l'eau, celles du bois et du fer sont données dans les tableaux des pages précédentes.

Un calcul simple basé sur la notion de résistance thermique (voir complément page 206) montre que la puissance transférée au fer est 4 fois plus grande que celle transférée au bois. La conductivité thermique intervient aussi quand on touche un objet dont la température est plus élevée que celle de notre peau : la sensation de chaleur est d'autant plus forte que l'objet est bon conducteur de chaleur. Quand nous touchons un objet, ce n'est donc pas sa température que nous ressentons, mais l'intensité du flux thermique qui traverse notre peau.

Mais aussi…

Marcher sur le feu

La tradition existait déjà en Inde vers 1200 avant J.-C. : marcher pieds nus sur un lit de braises pour montrer la suprématie de l'esprit sur le corps. L'absence de brûlure vient de la très faible conductivité thermique des braises, environ 0,1 W m^{-1} K^{-1}. La marche doit être ni trop rapide ni trop lente pour éviter le contact prolongé avec les braises, et il faut croire à la suprématie de la physique !

© Adobe Stock

La marche sur les braises.

Comment s'effectue la convection ?

La convection est plus difficile à modéliser que la conduction, car le transfert de chaleur y est couplé au *mouvement* d'un fluide. La puissance thermique transférée s'écrit sous la même forme que celle de la page 189 :

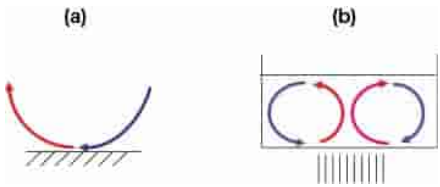
$$P = hS\,(T_1 - T_2)$$

où S est la surface de contact, T_1 la température à la surface du solide et T_2 celle du fluide loin de la surface. Mais le « coefficient d'échange » h, qui s'exprime en W m^{-2} K^{-1}, dépend de nombreux facteurs, et on utilise souvent des valeurs empiriques adaptées à chaque situation. On distingue deux sortes de convection selon l'origine du mouvement du fluide.

La convection naturelle

Quand un corps solide baigne dans un fluide de température inférieure à la sienne, la couche de fluide à son contact s'échauffe par conduction. Elle monte sous l'effet de la poussée d'Archimède, et elle

est remplacée par une autre qui s'échauffe à son tour : un transfert de chaleur a lieu spontanément du corps solide vers le fluide. Ce sont les différences de températures au sein du fluide qui produisent son mouvement, et on parle de « convection naturelle ». C'est le cas des ascendances thermiques (figure a page suivante) et des mouvements verticaux de l'eau chauffée dans une casserole (figure b). Le coefficient h dépend un peu de la différence de température, mais surtout de la forme et de l'orientation de la surface de contact.



Exemples de transfert thermique par convection naturelle.

(a) Convection de l'air au contact du sol chaud.
(b) Convection de l'eau chauffée dans un récipient.

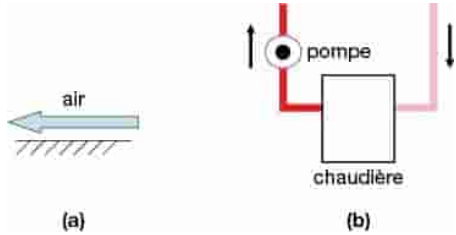
Pour chauffer une pièce, on utilise un poêle à bois, des « radiateurs » en fonte remplis d'eau chaude ou des convecteurs électriques. Mais c'est la convection naturelle de l'air au contact des parties chauffées qui transmet la chaleur à l'ensemble de la pièce. Et contrairement à ce qu'on entend dire parfois, ce n'est pas la chaleur qui monte, c'est l'air chaud ! C'est aussi par convection naturelle que les gaz chauds transmettent la chaleur aux parois des poêles à bois et aux foyers des chaudières.

Poêle à bois.

La convection forcée

Le mouvement du fluide est parfois imposé par une cause extérieure, indépendante des différences de température. On peut citer comme exemples le vent pour la convection de l'air (figure a page

suivante) et la pompe qui fait circuler l'eau chaude dans les canalisations de chauffage central (figure b).



Exemples de transfert thermique par convection forcée.

(a) Refroidissement d'une surface par un flux d'air.
(b) Circulation de l'eau chaude assistée par une pompe.

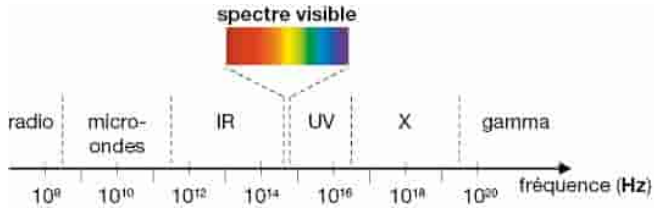
La convection forcée accélère considérablement les échanges de chaleur. Le coefficient h est dans ce cas proportionnel à la racine carrée de la vitesse du fluide par rapport à la surface. Il dépend aussi de la forme et de l'orientation de la surface de contact.

Qu'est-ce que le rayonnement ?

La surface de tous les corps matériels émet un rayonnement constitué de *radiations* qui transportent de l'énergie. Quand ces radiations interagissent avec un autre corps, certaines sont absorbées et leur énergie est convertie en chaleur.

Les radiations

Les radiations sont des *ondes électromagnétiques*. Elles transportent de l'énergie sous forme électrique et magnétique, et se propagent avec une grande célérité dans certains milieux matériels et dans le vide. Leur célérité est maximale dans le vide, où elle atteint $c = 299\,796$ km/s, c'est-à-dire la vitesse de la lumière. La lumière est en effet la superposition de radiations dont la fréquence est comprise dans la plage étroite $4{,}3 \times 10^{14}$ Hz à 7×10^{14} Hz, que l'on appelle le *spectre visible*. Quand une de ces radiations arrive à nos yeux, nous percevons une couleur. Mais le spectre visible n'est qu'une infime partie de l'ensemble des ondes électromagnétiques. Leur fréquence peut varier dans un très large domaine, et on la repère sur une échelle *logarithmique* : à un *décalage* horizontal donné correspond une *multiplication par un facteur constant*.



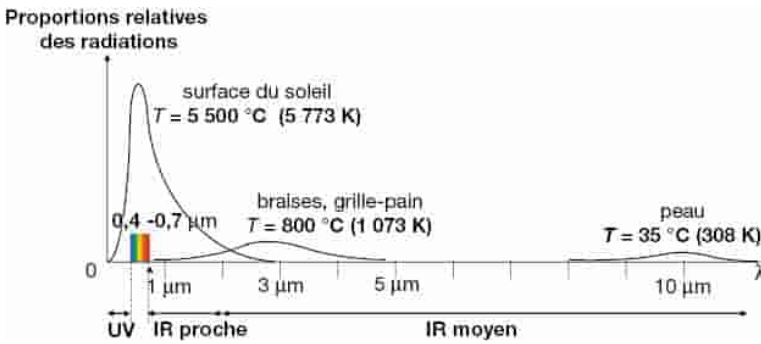
Les différentes gammes de fréquences des ondes électromagnétiques.

Les radiations du *spectre visible* sont perçues comme des *couleurs*.

On peut aussi caractériser une radiation par sa longueur d'onde dans le vide $\lambda = c/f$. Celle des radiations du spectre visible est comprise entre 0,4 et 0,75 micron (400 à 750 nm).

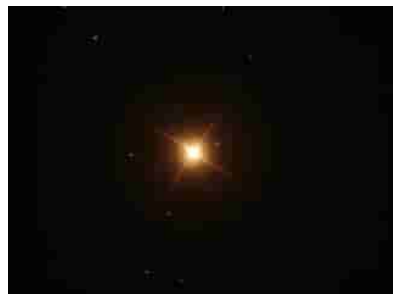
Émission et absorption de rayonnement

Plus la température d'un corps est élevée, plus le rayonnement qu'il émet comporte de radiations de courte longueur d'onde. La figure ci-dessous montre la composition du rayonnement de trois corps de températures très différentes.



Composition du rayonnement émis par la surface du Soleil, un grille-pain et notre peau.

• La température de la surface du Soleil est égale à 5 500 °C (5 773 K). Son rayonnement présente un pic marqué dans le spectre visible, avec un maximum à $\lambda = 0{,}5$ micron (500 nm) qui correspond à la couleur verte. Il comporte aussi des radiations de l'infrarouge proche et une fraction des radiations UV. Nous percevons la lumière du Soleil *blanche*, mais certaines étoiles émettent une lumière *colorée*. Sirius, dans la constellation du Grand Chien, est l'étoile la plus brillante du ciel. Sa température de surface est 9 900 K et le pic de son rayonnement est décalé vers les courtes longueurs par rapport à celui du Soleil : Sirius est *bleue*. Dans la constellation du Taureau, Aldébaran, dont la surface est à 3 900 K, est *orangée*.



Photos Jérôme Astréoud

Sirius et Aldébaran.

• La température du filament d'un grille-pain et des braises d'un feu de bois est environ de 800 °C. Ces corps émettent principalement des radiations infrarouges de courte longueur d'onde et une faible fraction de radiations du spectre visible qui les colorent en rouge.

• La peau de notre corps, à 35 °C, émet un rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde. C'est aussi le cas de tous les objets et substances à température ambiante.

La puissance totale du rayonnement *émis par mètre carré de surface* augmente très vite avec la température. Celle des braises est environ 150 fois plus grande que celle de la peau, et celle de la surface du Soleil environ 800 fois plus grande que celle des braises.

La puissance du rayonnement émis et absorbé par un corps dépend aussi de sa *nature*, comme le montrent les exemples suivants :

• Quand leur surface est polie, les métaux réfléchissent la plus grande partie des radiations visibles et infrarouges qu'ils reçoivent. Ils n'en absorbent qu'une faible partie et, corrélativement, en émettent eux-mêmes très peu. Avec les surfaces métallisées, on fait des miroirs mais aussi des couvertures de survie, des pare-soleil de voiture et des sacs pour surgelés.

• Inversement, les papiers et les tissus noirs absorbent une grande partie des radiations du spectre visible et souvent même du rayonnement infrarouge. Ils s'échauffent donc beaucoup au soleil.

• Le verre ordinaire est transparent aux radiations du spectre visible, mais il absorbe beaucoup celles de l'infrarouge moyen et lointain : la vitre d'une fenêtre ne s'échauffe pas au soleil, mais celles du four et du poêle sont brûlantes.

• Les propriétés d'absorption de l'eau sont semblables à celles du verre. Les molécules d'eau absorbent beaucoup les micro-ondes. On se sert de ces radiations pour chauffer les plats qui contiennent de l'eau liquide ou solide.

Ça chauffe, mais comment ?

Que se passe-t-il dans un feu de bois ?

Le feu est un symbole de chaleur et de convivialité qui a des racines profondes dans notre subconscient, comme l'a bien montré Gaston Bachelard dans *La Psychanalyse du feu*. Allumer un feu entre trois grosses pierres ou dans une cheminée, c'est accomplir un vieux rituel : une feuille de papier froissée, quelques brindilles, une allumette frottée, et bientôt une flamme s'élève et se met à danser. Mais que se passe-t-il exactement dans le foyer, et qu'est-ce qu'une flamme ?

Pour que le bois brûle, il faut commencer par le chauffer afin de *vaporiser* l'eau qu'il contient : le bois vert ou humide brûle mal. La vapeur sort des fibres du bois et se condense en gouttelettes qui forment une « fumée » blanche. Quand le bois a perdu la plus grande partie de son eau, sa température monte rapidement. À partir de 250 °C environ, des réactions chimiques commencent à produire un solide, le charbon de bois, ainsi que des gaz. Cette première étape, la *pyrolyse*, est due uniquement à la chaleur ; l'oxygène de l'air n'intervient pas. Parmi les gaz formés, il y a un peu de vapeur d'eau et de gaz carbonique, mais surtout beaucoup de *gaz combustibles* qui représentent jusqu'à 80 % de la masse initiale du bois.

La danse hypnotique des flammes.

La deuxième étape est la *combustion*, dans laquelle les gaz combustibles et le charbon de bois réagissent avec l'oxygène de l'air. La combustion du charbon de bois donne des braises incandescentes de couleur rouge foncé, et celle des gaz donne les *flammes*, constituées de gaz chauds invisibles et de *particules de carbone* incandescentes qui émettent de la lumière. Le centre de la flamme, où la température atteint 1 500 °C, est de couleur jaune. Sur les bords, de couleur orangée, la température est de 1 000 °C environ. Ce sont ces réactions de combustion qui dégagent de la chaleur. Quand elles sont terminées, il ne reste que des cendres légères, essentiellement des résidus minéraux.

Il faut donc de la chaleur pour faire démarrer le feu. On amorce le processus en enflammant du papier avec une allumette (voir focus page suivante). La combustion du papier fournit la chaleur nécessaire à la pyrolyse des brindilles. La combustion des brindilles dégage la chaleur qui vaporise l'eau des branches plus grosses, puis leur pyrolyse, et ainsi de suite jusqu'aux bûches.

Focus

Enflammer une allumette

La tête de l'allumette est recouverte d'un composé soufré, et le grattoir de la boîte est tapissé de phosphore. Quand on gratte une allumette, le frottement chauffe le composé soufré et le phosphore, qui peuvent alors réagir. La réaction dégage de la chaleur, et le bois de l'allumette brûle dans l'air. Au début du

XIXe siècle, la tête des premières allumettes était couverte d'un mélange de composés soufrés et phosphorés que l'on enflammait en frottant sur un corps dur. Après beaucoup d'inflammations involontaires, leur usage a été interdit, sauf naturellement pour les cow-boys au cinéma.

Chauffer l'eau sur le gaz

Cette opération banale met en jeu tous les modes de transfert de chaleur.

• Les gaz chauds produits par la combustion transfèrent de la chaleur au fond de la casserole par rayonnement et convection naturelle.

• La chaleur est transmise par conduction du fond de la casserole à tout le métal.

• Le métal transfère de la chaleur à l'eau par convection naturelle.

Parmi toutes ces étapes, la plus rapide est la conduction dans le métal, même si le fond de la casserole est en acier inox. On n'économise donc pas de gaz en utilisant une casserole en cuivre. Par contre, il est recommandé de poser un couvercle sur la casserole pour éviter le transfert de chaleur de l'eau à l'air par convection.

Fondre comme neige au soleil ?

Cette expression, qui s'applique à une quantité qui disparaît rapidement, est-elle vraiment fondée ? La neige est faite d'une multitude de microcristaux de glace et de beaucoup d'air, et elle fond quand les cristaux reçoivent assez de chaleur pour se transformer en eau liquide. Examinons donc comment la neige échange de la chaleur avec son environnement.

• Elle *reçoit de la chaleur* de l'air par convection naturelle et en absorbant son rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde. Ses microcristaux de glace réfléchissent la plus grande partie du rayonnement du soleil, jusqu'à 90 % pour la neige poudreuse. La neige reçoit donc peu de chaleur du soleil, en particulier quand ses rayons arrivent rasants.

• Elle *cède de la chaleur* en émettant un rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde. Quand sa température est basse, ses cristaux se subliment, c'est-à-dire se transforment en gaz sans passer par l'état liquide. Cette transformation absorbe de la chaleur et refroidit la neige.

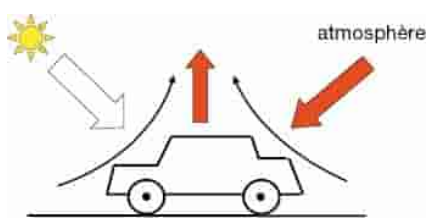
Photo Frauke Baymann

La neige au soleil.

Quand la température de l'air est négative et le ciel dégagé, le bilan de ces échanges est tel que la neige peut rester longtemps au soleil sans *fondre* appréciablement. Mais l'arrivée des nuages et le vent changent la donne : les nuages, qui masquent partiellement le soleil, absorbent le rayonnement de la neige et en réémettent une partie vers le sol. Quant au vent, il amplifie l'apport de chaleur par convection. C'est le *redoux*, que craignent les skieurs. Celui-ci est particulièrement marqué lors des épisodes de foehn (voir le second complément page 186).

Bilan thermique d'une voiture garée au soleil

Chacun sait que la carrosserie d'une voiture, et par conséquent son habitacle, peuvent devenir très chauds quand elle est garée au soleil. La température de la carrosserie est déterminée par ses échanges de chaleur avec son environnement (figure page suivante) :



Les échanges de chaleur qui déterminent la température d'une voiture au soleil.

La couleur indique la nature du rayonnement. Blanc : rayonnement du spectre visible et IR proche (Soleil) ; rouge : rayonnement IR de grande longueur d'onde (atmosphère et voiture) ; flèches noires : convection.

• La voiture *reçoit de la chaleur*. Le rayonnement du soleil, constitué surtout de radiations du spectre visible et infrarouge proche, est en

partie réfléchi ou diffusé par la carrosserie, le reste est absorbé et transformé en chaleur. Les carrosseries noires absorbent davantage ce rayonnement que les blanches. La voiture absorbe aussi en partie le rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde de l'air. Ces transferts tendent à élever la température de la carrosserie.

• La voiture *cède de la chaleur*. Elle émet un rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde, d'autant plus intense que sa température est élevée. La voiture cède aussi de la chaleur à l'air par *convection naturelle*.

Quel est le bilan de tous ces échanges ? La voiture reçoit de la chaleur, ce qui fait monter sa température. Plus cette température s'accroît, plus elle cède de chaleur à son environnement. L'équilibre est atteint quand la température est telle que la chaleur cédée est égale à la chaleur reçue. D'après ce qui précède, cette température est plus élevée pour une voiture foncée que pour une claire. Quand la voiture roule, les échanges de chaleur par rayonnement ne sont pas modifiés, mais la convection de l'air est fortement amplifiée par la *convection forcée* due au déplacement de la voiture : la carrosserie se refroidit.

La voiture échange aussi de la chaleur avec le sol par conduction, mais la conductivité thermique des pneus est faible et l'effet de cet échange est négligeable.

Mais aussi…

Les ours blancs et la robe noire des bédouins

Un objet blanc exposé au soleil absorbe beaucoup moins les radiations du *spectre visible* que s'il était noir. On peint les murs en blanc dans les pays ensoleillés, les robes des touaregs sont blanches et les panneaux solaires sont noirs. Mais les objets noirs cèdent plus de chaleur par rayonnement infrarouge que les blancs. L'ours polaire a intérêt à conserver sa température corporelle plutôt que d'essayer d'absorber le rayonnement du soleil qui est quasi inexistant durant le long hiver arctique. Quant à la robe noire des bédouins, elle crée une ventilation qui compense l'échauffement dû à sa couleur foncée.

Qu'appelle-t-on effet de serre de l'atmosphère ?

On attribue souvent le dérèglement climatique à « l'effet de serre » de l'atmosphère, un terme emprunté au vocabulaire du jardinage.

Mais en quoi consiste cet effet ?

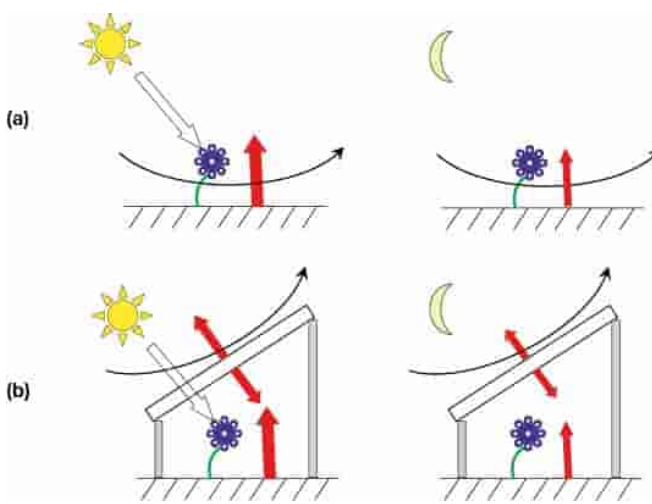
La serre du jardinier

• En l'absence de serre (figure a page suivante) : le jour, le sol absorbe le rayonnement solaire, ce qui le réchauffe, et il émet un rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde, ce qui le refroidit. Le sol étant généralement plus chaud que l'air, la convection tend à refroidir le sol. La nuit, le sol cède de la chaleur par rayonnement et par convection naturelle.

• Dans la serre (figure b) : le verre est transparent au rayonnement du soleil, mais il absorbe presque totalement les radiations infrarouges de grande longueur d'onde. Le jour, le sol et le contenu de la serre sont chauffés par le rayonnement du soleil. Le rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde émis par le sol est absorbé par le vitrage qui le réémet vers l'intérieur et vers l'extérieur de la serre. La convection de l'air refroidit le vitrage, mais pas le sol. La nuit, le vitrage chauffé par le rayonnement du sol émet un rayonnement infrarouge vers le sol et vers l'espace. Dans la serre, le sol n'est pas refroidi par la convection de l'air. La comparaison des figures a et b montre que le vitrage a deux effets :

– un effet « rayonnement ». Le vitrage absorbe le rayonnement infrarouge émis par le sol et en restitue une partie à l'intérieur de la serre ;

– un effet « couvercle ». Le vitrage supprime le refroidissent par convection de l'air.

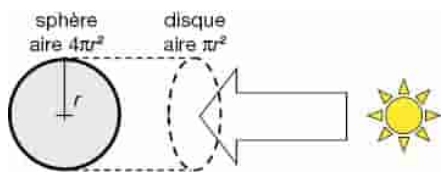


Bilan thermique qualitatif de la serre du jardinier.

L'expérience montre que c'est l'effet « couvercle » qui est le plus important. La plupart des serres actuelles ne sont pas couvertes de verre, mais de polyéthylène. Cette matière absorbe très peu le rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde, et son effet « rayonnement » est négligeable.

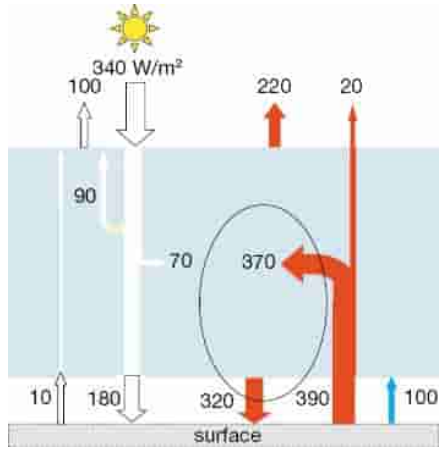
Le bilan thermique de la Terre

Le bilan thermique de la surface de la Terre et de son atmosphère dépend du lieu considéré et du moment de l'année. Nous décrivons ici un bilan *global* basé sur des *valeurs moyennes*, la moyenne étant établie sur l'ensemble de la surface terrestre et sur une année. À partir de la température de la surface du Soleil (figure de la page 195) et de la distance Terre-Soleil (tableau de la page 15), on calcule que chaque mètre carré d'un disque de rayon égal à celui de la Terre, extérieur à l'atmosphère et *perpendiculaire au rayonnement* (figure page suivante), reçoit du Soleil une puissance de 1 360 W.



Puissance du rayonnement solaire intercepté par la Terre.

À cause de la rotation de la Terre, cette puissance se répartit sur toute la surface terrestre, qui est quatre fois plus grande que celle du disque. La puissance *moyenne* du rayonnement solaire reçu par un mètre carré d'atmosphère terrestre est donc égale au quart de 1 360, soit 340 W. Ce rayonnement est en partie absorbé par l'atmosphère et par la surface terrestre, qui échangent elles-mêmes de la chaleur. Ces échanges sont schématisés ci-dessous.



Bilan thermique de la surface terrestre et de l'atmosphère.

Le code des couleurs est le même que celui de la figure page 201.
L'atmosphère est en bleu, la surface terrestre, continents et océans confondus, en gris.
Les nombres sont des densités de puissance en W/m². Pour obtenir les puissances échangées à l'échelle de la Terre, il faut les multiplier par sa surface. Flèche verte : convection et évaporation/condensation. La partie entourée met en évidence « l'effet de serre » de l'atmosphère.

• Le rayonnement du Soleil est essentiellement constitué de radiations du spectre visible et de l'infrarouge proche. L'air pur et sec est quasiment transparent à ce rayonnement, mais les gouttelettes d'eau des nuages en renvoient une partie vers l'espace (90 W/m²), et la vapeur d'eau, l'ozone et les poussières de l'atmosphère en absorbent une autre partie (70 W/m²). La puissance du rayonnement solaire qui arrive au sol est donc de 180 W/m². Une faible partie (10 W/m²) est réfléchie vers l'espace, en particulier par les sols enneigés. L'*albédo*, qui est la proportion du rayonnement solaire renvoyé vers l'espace par les nuages et par le sol, est donc égal à 30 % environ.

• La température moyenne de la surface terrestre, océans et continents confondus, est de 15 °C. Cette surface émet un rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde d'une puissance moyenne de 390 W/m², représenté en rouge sur la figure. Sur ces 390 W/m², seule une très faible partie, 20 W/m², parvient à traverser l'atmosphère. Tout le reste (370 W/m²) est absorbé par l'atmosphère, essentiellement par les « molécules à effet de serre » : vapeur d'eau et, dans une moindre mesure, dioxyde de carbone CO_2 et méthane CH_4 (focus ci-dessous). D'autres transferts de chaleur ont lieu de la surface de la Terre vers l'atmosphère (flèche verte sur la figure) : la convection due au vent, et l'évaporation des océans. En effet, cette évaporation prélève de la chaleur aux océans, et l'atmosphère la récupère quand la vapeur se condense en formant des nuages. La figure montre que l'atmosphère est essentiellement chauffée par la surface de la Terre, donc par sa base. Elle émet un rayonnement

infrarouge de grande longueur d'onde vers l'espace (220 W/m²), *mais aussi vers la Terre* (320 W/m²) qui l'absorbe. C'est grâce à l'absorption du rayonnement terrestre par certaines molécules de l'atmosphère et la réémission de ce rayonnement vers la Terre que la température moyenne à la surface de la Terre est égale à 15 °C. On a calculé que, sans atmosphère, cette température chuterait à – 18 °C : la vie serait impossible sur Terre.

Focus

Les molécules à effet de serre

Les molécules possèdent plusieurs *modes de vibration* caractérisés par leur fréquence. Elles absorbent l'énergie des radiations dont la fréquence est égale à celle de l'un de ces modes, et cette énergie est convertie en énergie de vibration. Certaines molécules de l'atmosphère, comme H_2O, CO_2, CH_4, N_2O, absorbent les radiations IR de grande longueur d'onde émises par la surface terrestre, ce qui accroît l'agitation thermique et donc la température de l'atmosphère.

La surface de la Terre reçoit aussi de la chaleur venue *de l'intérieur*. Quand on s'enfonce à l'intérieur de la Terre, la température s'élève d'environ un degré tous les 30 m dans nos régions. Cette élévation de température est due au flux de chaleur qui monte en permanence vers la surface. Ce dernier est produit par l'absorption des radiations émises par les éléments radioactifs des roches, mais aussi par le lent refroidissement de la Terre qui se poursuit depuis sa formation. Le flux de chaleur *moyen* qui arrive à la surface a été évalué à environ 100 milliwatts par mètre carré. Il est donc négligeable dans le bilan global de la Terre. Mais en certains points du globe, il est assez important pour être exploité : c'est l'énergie géothermique, qui se manifeste parfois de façon spectaculaire.

© Getty Images

En Islande : les mares de boue brûlante des solfatares et le geyser Strokkur.

Vous avez dit « effet de serre de l'atmosphère » ?

Sur la figure du bas de la page 204, nous avons entouré l'absorption par l'atmosphère du rayonnement émis par la surface de la Terre, et la restitution d'une grande partie de ce rayonnement. Ce phénomène est tout à fait semblable à l'effet « rayonnement » du vitrage de la serre du jardinier (figure b page 203), et c'est là l'origine de l'expression « effet de serre de l'atmosphère ». Ceux qui l'ont introduite ignoraient que l'efficacité du vitrage de la serre venait principalement de l'effet « couvercle » qui n'a, bien sûr, pas d'équivalent dans le cas de l'atmosphère. Mais l'expression est parlante, facile à utiliser auprès du public, et elle est restée. Les climatologues l'évitent et préfèrent introduire la notion de « forçage radiatif ».

Complément

www.lienmini.fr/39798-cpltsP206

Résistance thermique et double vitrage

4

Un monde de lumières et de couleurs

La lumière et ses changements de direction

À un détour apparut l'étang, comme une gravure au burin fouillée jusqu'au moindre entrelacs, avec de fortes oppositions de lumière et de nuit, le tout baigné dans un fluide bleuâtre. Deux lunes se partageaient l'espace, aussi brillantes et immobiles l'une que l'autre, mais le ciel des eaux était encombré. D'abord les joncs en palissades serrées, dont certains formaient des îlots et des archipels, puis un semis de disques noirs qui m'intriguaient. Je compris à la fin qu'il s'agissait de nénuphars dressés sur la tranche et doublés par leurs reflets.

Samivel, L'Œil émerveillé, ou la Nature comme spectacle

Les êtres vivants ont développé diverses adaptations pour utiliser la lumière du Soleil : les bactéries photosynthétiques et les plantes pour en tirer de l'énergie, les animaux pour percevoir leur environnement. Les êtres humains sont allés plus loin : ils ont réussi à comprendre ce qu'est la lumière et ils lui ont trouvé de nombreuses applications. L'interaction de la lumière avec la matière crée de multiples phénomènes, mais nous y sommes si bien habitués que seuls les plus spectaculaires attirent notre attention. Tous offrent pourtant matière à émerveillement, à commencer par le plus banal, mais aussi le plus précieux : la vision !

Qu'est-ce que la lumière ?

Nos organes de la vision sont sensibles aux radiations dont la longueur d'onde dans le vide est comprise entre 400 et 750 nm environ, et c'est la superposition de certaines de ces *radiations lumineuses* qui constitue la *lumière*. Quand la lumière interagit avec la matière, celle-ci renvoie des radiations que nous pouvons percevoir. Cette fenêtre ouverte sur le monde nous révèle un univers d'*objets lumineux* de couleurs et d'intensités très variées. Les animaux possèdent leur propre fenêtre de vision, qui diffère parfois de la nôtre.

Les sources de lumière

Certains objets émettent de la lumière sans être eux-mêmes éclairés. À haute température, les corps émettent un rayonnement qui comporte les radiations du spectre visible. C'est le cas du Soleil et des étoiles, mais aussi des braises et des particules de carbone incandescentes qui colorent les flammes des feux de bois. Quand le filament de tungstène d'une ampoule à incandescence est parcouru par un courant électrique, sa température monte jusqu'à 2 700 K environ : il émet une lumière blanche, un peu teintée de jaune. Certains gaz portés à haute température émettent des radiations du spectre visible. La lumière bleue des brûleurs des gazinières est due aux molécules de CO_2 produites par la combustion du butane. On la voit aussi à la base de la flamme d'une bougie.

Les molécules de CO_2 portées à haute température émettent des radiations « bleues ».

Certaines sources émettent une lumière *monochromatique*, c'est-à-dire dont toutes les radiations ont la même fréquence et donc la même longueur d'onde dans le vide :

• Le *laser* (acronyme de « *light amplification by stimulated emission of radiation* ») émet une lumière monochromatique *cohérente* : toutes ses radiations sont en phase et tout se passe comme si une unique radiation de grande intensité se propageait. Depuis les années 1960, ce fin pinceau de lumière qui peut transporter une grande puissance a reçu de nombreuses applications.

• Les LED (acronyme de « *light-emitting diode* ») émettent une lumière monochromatique non cohérente. Grâce à la synthèse additive des couleurs (voir complément page 248), on peut faire de la lumière blanche ou colorée en associant plusieurs LED. Leur faible consommation et leur longévité sont remarquables, et elles remplacent avantageusement les ampoules à incandescence.

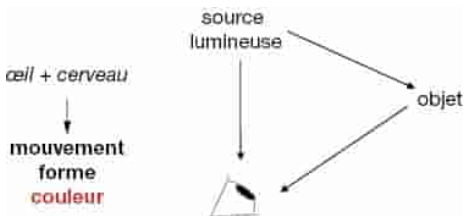
© Getty Images

Femelle du lampyre.

Des êtres vivants se servent d'une réaction chimique pour émettre de la lumière : c'est la *bioluminescence*. Chez le lampyre, la femelle, qui ne possède pas d'ailes, s'efforce d'attirer un mâle en émettant de la lumière : c'est le « ver luisant ». Chez les lucioles, c'est le mâle en vol qui se signale. De nombreux animaux qui vivent dans l'obscurité complète du fond des océans utilisent la bioluminescence pour se repérer.

Les objets éclairés

Certains objets n'émettent de la lumière que s'ils sont éclairés, et cette lumière dépend de leur nature et du rayonnement qu'ils reçoivent.



Nous percevons la lumière émise par les sources de lumière et les objets éclairés.

Nous voyons la Lune, les planètes et les comètes quand elles sont éclairées par le Soleil. La plupart des objets sont visibles parce qu'ils reçoivent les rayonnements émis par les sources de lumière et par d'autres objets éclairés.

Comment voyons-nous les objets lumineux ?

La vision en couleur

Les radiations lumineuses sont *invisibles*, mais nous les percevons quand la lumière émise par les sources de lumière et les objets éclairés arrivent à nos yeux. Elle traverse la cornée, et le cristallin la focalise sur la rétine, où se forme une *image inversée* des objets. La surface de la rétine est tapissée d'une multitude de cellules photoréceptrices de deux types : les cônes, concentrés au centre sur quelques millimètres carrés, et les bâtonnets, beaucoup plus nombreux, répartis sur le reste de la rétine. Les cônes sont sensibles à la *composition* de la lumière alors que les bâtonnets sont sensibles à son *intensité*. Il existe trois types de cônes, chacun réagissant aux radiations dans une certaine plage de longueurs d'onde. Cette plage est centrée à 420 nm pour les cônes « bleus », à 534 nm pour les cônes « verts ». Celle des cônes « rouges » est centrée à 564 nm et s'étend jusqu'à 740 nm. Les plages adjacentes se recouvrent largement. Les cellules absorbent les radiations et convertissent leur énergie en signaux électriques qui sont envoyés au cerveau. Celui-ci les analyse, et nous percevons une image redressée, colorée, et d'une certaine luminosité.

Quand notre œil reçoit une lumière *monochromatique*, nous percevons une *couleur* déterminée par sa *longueur d'onde*.

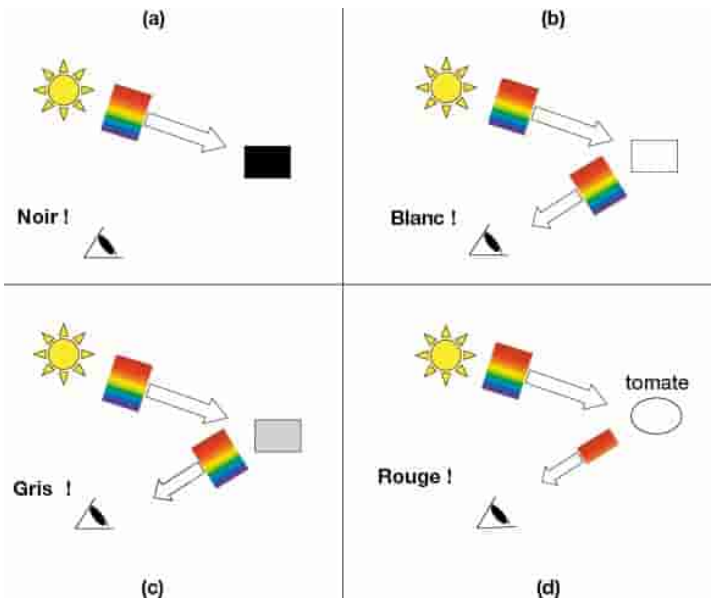
Plages de longueurs d'onde des radiations perçues comme des couleurs fondamentales.

Les limites indiquées n'ont qu'une valeur indicative : la couleur perçue varie de façon continue avec la longueur d'onde, et chaque individu a sa manière d'attribuer les couleurs. Dans la suite, nous appellerons, par exemple, radiation « bleue » une radiation dont la longueur d'onde est comprise entre 446 et 520 nm environ. Les guillemets sont là pour rappeler que les radiations elles-mêmes sont *invisibles*. Quand la lumière n'est pas monochromatique, la couleur perçue est déterminée par des processus physiologiques complexes. Le dysfonctionnement d'un ou de plusieurs types de cônes entraîne une anomalie de la perception des couleurs : le daltonisme. Dans sa forme la plus fréquente, ce sont les cônes « rouges » ou « verts », et la personne concernée a du mal à distinguer les nuances de rouge, de vert, de jaune et d'orangé. C'est une maladie héréditaire qui touche un homme sur douze et une femme sur deux cents.

Qu'est-ce que le noir, le blanc et la couleur ?

Le noir, c'est ce qu'on perçoit quand on ferme très fort les

paupières : c'est l'*absence de lumière*. C'est aussi ce qu'on perçoit dans une pièce totalement obscure et quand on regarde la nuit un ciel couvert. Nous disons qu'un objet est noir quand nous n'en recevons aucune lumière (sauf des reflets) quand il est éclairé par le Soleil (figure a page suivante). Quand un objet éclairé par le Soleil renvoie la lumière sans modifier sa composition, il nous paraît blanc (figure b). La lumière du Soleil est donc dite « blanche ». C'est le cas d'une feuille de papier, de la neige et de certains nuages. Mais on ne perçoit le blanc que si la lumière reçue est assez intense. Quand elle est trop faible, on perçoit un gris plus ou moins foncé (figure c). C'est ce qui se passe quand la feuille de papier et la neige sont à l'ombre. Un objet nous paraît coloré s'il nous envoie une lumière « colorée », c'est-à-dire dont la *composition en radiations du spectre visible* diffère de celle de la lumière blanche (figure d). Les cônes ne fonctionnent bien que si l'intensité de la lumière est suffisante. Quand ce n'est pas le cas, l'information transmise au cerveau par les bâtonnets est traduite en niveaux de gris : la nuit, les chats et tous les objets que nous voyons colorés le jour, sont gris.



Perception de différents objets éclairés par la lumière du Soleil.

La composition des rayonnements reçus et émis par les objets est indiquée. La lumière blanche *réfléchie* n'est pas représentée.

Pour nous éclairer la nuit ou quand la lumière du Soleil est trop faible, nous nous servons de sources de « lumière artificielle ». Si la lumière émise par ces sources a la même composition que celle du Soleil, la couleur des objets est la même qu'en plein jour. C'est à peu

près le cas des tubes fluorescents et des ampoules à LED. Pour l'éclairage urbain et sur les autoroutes, on utilise souvent des lampes à sodium basse pression, qui émettent une lumière jaune monochromatique de longueur d'onde 589 nm. C'est un mode d'éclairage économique, mais il fait disparaître les couleurs : les objets blancs ou jaunes le jour deviennent jaunes, les autres noirs ou gris. On peut le vérifier dans certains tunnels routiers.

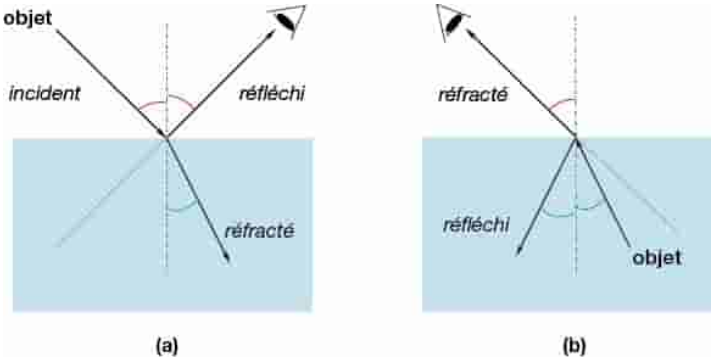
La place Dauphine à Paris.

Que se passe-t-il quand la lumière change de direction ?

Les radiations se propagent en ligne droite dans les milieux transparents et homogènes, et elles changent de direction à la surface de séparation de ces milieux. Habituellement, les aspérités de cette dernière sont beaucoup plus grandes que la longueur d'onde des radiations, et on peut décrire ces changements de direction comme s'il s'agissait de « rayons lumineux ».

Réflexion et réfraction de la lumière

Nous voyons un objet dans la direction d'où arrive sa lumière, même si celle-ci a changé de direction avant d'arriver à nos yeux. L'exemple classique est celui des reflets renvoyés par un plan d'eau.



Réflexion et réfraction des rayons lumineux au passage de l'air à l'eau.

Les angles notés en rouge sont égaux sur les deux figures. Il en est de même pour les angles notés en vert. La normale à la surface est en points tirets, et les tirets indiquent les directions perçues.

• Une petite partie du faisceau de rayons lumineux émis par l'objet est *réfléchie* par la surface, l'autre est *réfractée* : en pénétrant dans l'eau, ils se *rapprochent* de la normale (figure a). Les rayons réfléchis semblent provenir d'un objet symétrique par rapport à la surface de l'eau : c'est l'effet miroir.

• Les rayons lumineux émis par les objets immergés sont aussi réfléchis et réfractés à la surface (figure b). Les rayons réfractés suivent le trajet *inverse* de celui représenté en (a) : en passant de l'eau à l'air, ils s'*écartent* de la normale. Le rayon réfracté semble provenir d'un objet plus proche de la surface qu'il n'est en réalité. La partie immergée des objets paraît « relevée », ce qui explique l'aspect « brisé » d'un bâton plongé dans l'eau.

L'effet miroir fait surgir Nessie dans un loch d'Écosse.

La réflexion totale

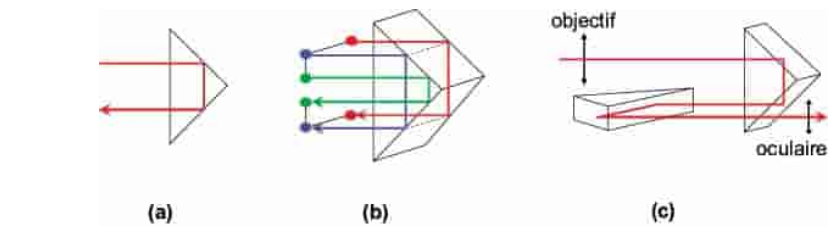
Sur le schéma de la page précédente, les angles notés rouge et vert sont liés par une relation qui fait intervenir l'*indice de réfraction* de l'air, égal à 1,00, et celui de l'eau, égal à 1,33 (voir complément page

225).

• Sur la figure a, quand l'angle d'incidence (en rouge) varie de 0 à 90°, l'angle de réfraction (en vert) varie de 0 à 48°.

• Sur la figure b, quand l'angle d'incidence (en vert) varie de 0 à 48°, l'angle de réfraction (en rouge) varie de 0 à 90°. Si l'angle d'incidence dépasse 48°, le rayon réfracté disparaît et la lumière incidente est entièrement réfléchie dans l'eau : c'est la « réflexion totale ».

Ce phénomène est souvent exploité dans les instruments d'optique, où il remplace avantageusement les miroirs. Pour le passage du *verre* à l'*air*, l'angle limite vaut 42°, et un angle d'incidence de 45° suffit pour obtenir la réflexion totale. La figure ci-dessous montre comment il est utilisé dans les jumelles.

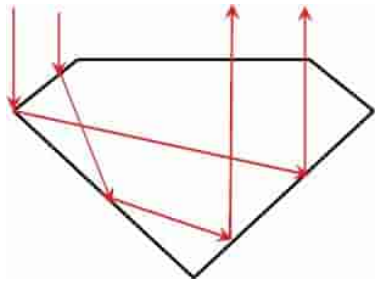


Redressement d'une image par réflexion totale dans deux prismes.

(a) Dans un prisme, deux réflexions totales successives réfléchissent totalement les rayons lumineux.
(b) Inversion du haut et du bas par un prisme vertical.
(c) Inversion complète par passage dans un prisme vertical, puis un prisme horizontal. Ce dernier crée de plus un *décalage* horizontal.

Pour élargir le champ visuel et exploiter pleinement la luminosité des objectifs de grand diamètre, la séparation de ces derniers doit être nettement plus grande que celle des oculaires. Il faut aussi inverser le haut et le bas, et la droite et la gauche avant que la lumière n'arrive sur l'oculaire. On obtient les deux effets en faisant traverser aux rayons lumineux un prisme « vertical » puis un prisme « horizontal ».

La réflexion totale est aussi exploitée dans la taille des diamants. Grâce à son indice de réfraction très élevé, le diamant réfléchit 17 % de la lumière qu'il reçoit (voir le complément page 225). Mais on peut le rendre encore plus brillant en le taillant de façon adéquate. En effet, l'angle limite est particulièrement petit et on peut tailler des facettes de telle façon que la plus grande partie de la lumière qui pénètre soit renvoyée dans la direction de la lumière incidente.

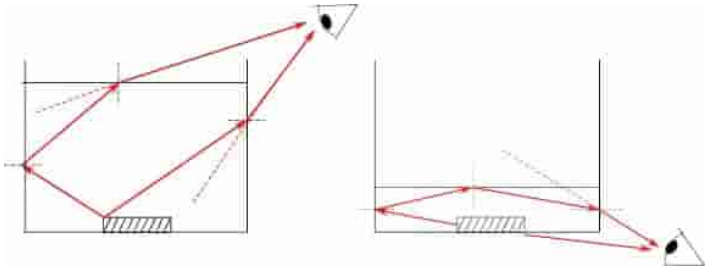


La taille du diamant « en brillant ».

Les angles et les proportions relatives des facettes sont tels que le maximum de lumière est renvoyé par réflexion totale dans la direction de la lumière incidente.

Un peu de magie : la duplication des pièces de monnaie et l'homme invisible

On peut exploiter les changements de direction de la lumière pour dupliquer les pièces de monnaie. Il suffit pour cela de placer une pièce au fond d'un verre et d'ajouter un peu d'eau. En jouant sur le niveau de l'eau et sur la hauteur des yeux, on peut faire apparaître une deuxième pièce.



La duplication des pièces de monnaie.

Le héros du roman *L'Homme invisible* de H.G. Wells, paru en 1897, était beaucoup plus ambitieux. Au chapitre XIX, il raconte qu'il s'est inspiré de la vue d'un glaçon transparent dans un verre d'eau : les indices de réfraction de la glace et de l'eau étant très proches, la lumière traverse le glaçon sans être ni réfléchie ni déviée, et le glaçon est quasi invisible. Lui-même s'est rendu invisible en avalant une substance qui a donné à son corps un indice de réfraction égal à celui de l'air. Wells reconnaissait en privé que son héros aurait dû être *aveugle*. En effet, on ne perçoit un objet que si le cristallin focalise sur la rétine la lumière qu'il nous envoie. Il faut pour cela que l'indice de réfraction du cristallin soit supérieur à celui du « corps vitré » de l'œil, ce qui n'était pas le cas de l'œil de l'homme invisible dont tout le corps avait le même indice que l'air. Mais Wells n'avait pas vu un autre problème. Les cellules de la rétine *absorbent* la lumière, ce qui explique que la pupille des yeux soit *noire*. Les personnes qui regardaient le héros auraient dû voir deux points noirs à l'emplacement de ses yeux. Pour qu'un corps soit complètement invisible, il faut que la lumière le *contourne* et reparte dans une direction telle qu'un observateur la perçoive comme si elle provenait de la source qui éclaire le corps. Des matériaux possédant de telles propriétés sont actuellement à l'étude.

Comment obtenir un bel effet miroir ?

Des reflets aux miroirs

Dès qu'il y a un peu de soleil, les reflets naissent et animent le paysage. Mais pour obtenir un bel effet miroir avec des images nettes et non déformées, il faut une surface assez grande et parfaitement plane. L'eau calme d'une mare ou d'un étang ne réfléchit que 2 % de la lumière, mais elle est idéalement plane et lisse, et ses reflets font le bonheur des photographes.

Photo 1 Morgane Fournier

L'effet miroir des plans d'eau.

Le lac Miroir au petit matin (Hautes-Alpes) et un étang de Camargue le soir (Gard). Les reflets sont bien visibles quand la surface réfléchissante est à l'ombre.

Les surfaces métalliques soigneusement polies réfléchissent pratiquement toute la lumière qu'elles reçoivent. Dans l'Antiquité, on utilisait l'argent ou le bronze, qui finissaient par s'oxyder au contact de l'air. Au Moyen Âge, le problème fut partiellement résolu en protégeant le métal avec une plaque de verre. Au XVe siècle, les maîtres verriers de Venise mirent au point la méthode de l'amalgame d'étain, qui est à l'origine du mot « tain » : une plaque de verre était couverte de fines feuilles d'étain, qui étaient elles-mêmes recouvertes de mercure. De nos jours, on recouvre une plaque de verre d'une mince couche d'aluminium ou d'argent qui est protégée de l'oxydation de l'air par une couche de cuivre.

Les miroirs ne servent pas qu'à se « mirer ». À Odeillo dans les Pyrénées-Orientales, 63 miroirs plans tournent pendant la journée pour suivre la marche du Soleil. Ils renvoient sa lumière vers un miroir parabolique qui la concentre à son foyer, où la puissance du rayonnement atteint 1 MW. Les chercheurs l'utilisent pour étudier le comportement des matériaux à haute température dans des conditions de très grande pureté. D'autres travaux sont consacrés à la conversion de l'énergie solaire en électricité.

Focus

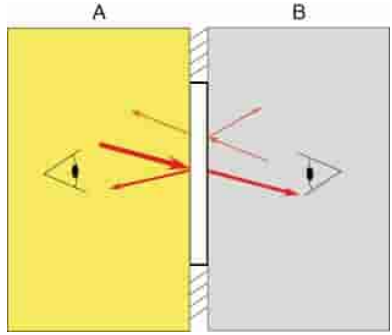
Les centrales solaires à concentration

Au nord de la Chine, à Duhuang dans le désert de Gobi, 12 000 miroirs répartis sur 8 km^2 renvoient les rayons du Soleil vers le sommet d'une tour de 260 mètres. Le rayonnement solaire est absorbé par un fluide « caloporteur » et la chaleur est utilisée pour produire la vapeur d'eau qui fait tourner des turbines. La puissance de cette centrale, qui fonctionne depuis 2018, est de 100 MW. La chaleur étant stockée dans le fluide caloporteur, ces centrales peuvent fonctionner longtemps après le coucher du soleil, ce qui n'est pas le cas des centrales à panneaux photovoltaïques.

Qu'est-ce qu'un miroir sans tain ?

L'identification du coupable par un témoin placé derrière un miroir sans tain fait partie des séquences classiques des séries policières. Son principe repose sur un phénomène remarquable mais tellement banal que nous n'y faisons pas attention : selon les conditions d'éclairement, une vitre peut se comporter comme un milieu transparent ou comme un miroir. Dans le métro qui roule en surface, nous voyons le monde extérieur à travers les vitres, à peine perturbé par les reflets des objets à l'intérieur. Mais dès que le métro devient souterrain, les reflets dominent et les vitres se transforment en miroirs. C'est ce qui permet de s'approcher la nuit d'une pièce éclairée et de voir à l'intérieur sans être vu.

Une pièce éclairée A est séparée d'une pièce obscure B par un mur percé d'une vitre (figure page suivante). Une personne située dans A reçoit très peu de lumière venant de B, mais elle voit les reflets des objets éclairés situés de son côté : pour elle, la vitre est un miroir. Par contre, une personne située dans B voit bien ce qui se passe dans A et n'est pas gênée par les reflets des objets qui sont de son côté. La personne située en A pourrait se rendre compte que la vitre réfléchit moins bien la lumière qu'un vrai miroir. On utilise donc un verre particulièrement réfléchissant et on ajoute parfois au dos une très fine couche de métal. Elle accroît le pouvoir réflecteur tout en restant assez mince pour que l'observateur en B puisse voir à travers. Si on éclairait la pièce B comme A, les deux personnes seraient dans la même situation.



Principe du miroir sans tain.

Wim Wenders a exploité cet effet dans une séquence très émouvante de son film *Paris, Texas*. Un homme et une femme qui s'aimaient ont été séparés depuis plusieurs années par les aléas de la vie. Lui a fini par la retrouver. Assis en B, il la voit dans la cabine A. Elle sait que quelqu'un est derrière le miroir, et des micros leur permettent de communiquer. Il raconte longuement leur histoire à la troisième personne, comme le ferait un témoin. Au bout d'un certain temps, elle comprend qui lui parle. Elle veut le voir, et se rapproche du miroir. Il lui demande alors d'éteindre presque toutes les lumières de sa cabine et, de son côté, il approche une petite lampe du miroir : la situation est devenue symétrique et chacun voit un peu l'autre.

Peut-on voir des faisceaux lumineux ?

L'air et les liquides contiennent souvent en suspension des particules minuscules, mais de dimension supérieure à la longueur d'onde des radiations lumineuses. Ces particules *diffusent la lumière* dans toutes les directions, sans modifier sa composition. L'œil d'un observateur ne reçoit qu'une faible intensité, et il ne la perçoit généralement que si elle bénéficie d'un *effet de contraste*.

La diffusion par les particules en suspension dans l'air

Quand la lumière du soleil éclaire une chambre, on voit souvent briller des petits points lumineux. Ce sont de minuscules poussières, bien visibles sur un fond sombre. Cet effet se manifeste aussi dans les salles obscures : la mise en marche d'un projecteur de cinéma ou d'un vidéoprojecteur fait apparaître un faisceau de lumière diffusée. On voit parfois des faisceaux divergents émerger des nuages épais qui masquent le soleil.

Faisceaux divergents issus du soleil, et convergence des rangées d'un champ de lavande.

C'est *a priori* étonnant : étant donné la distance du soleil, on s'attend à ce que ses rayons soient parallèles. Il s'agit en réalité d'un effet de *perspective* semblable à celui qui fait converger vers un point de fuite les rangées des champs de lavande, avec cependant une différence : les rayons du soleil ne proviennent pas d'un *point*, mais du *disque* solaire dont le diamètre angulaire est égal à 30 minutes d'arc environ. La lumière blanche qui passe par les trouées du nuage est diffusée dans toutes les directions par une multitude de particules en suspension dans l'air, et elle nous paraît bleutée sur le fond bleu du ciel.

Si nous voyons les nuages, c'est grâce à la diffusion de la lumière du soleil par leurs gouttelettes et leurs microcristaux de glace. Vus de dessus, en avion par exemple, les nuages sont d'un blanc éclatant. Mais la base d'un nuage ne diffuse vers le sol que la fraction de la lumière qui a réussi à le traverser : plus les nuages sont épais, plus leur base paraît sombre.

Les nuages : blancs, gris ou noirs ?

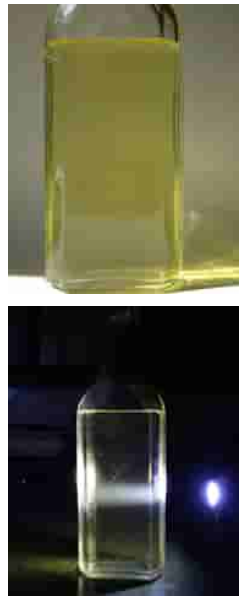
La photo du haut montre un cumulonimbus en formation. Le contraste est frappant entre la partie supérieure du nuage qui diffuse beaucoup de lumière, et la base sombre qui diffuse le peu de lumière qui a réussi à le traverser. Photo du bas : des cirrus étirés par le vent.

Les cas extrêmes sont les très fins cirrus, des nuages de haute altitude blancs et brillants qui contiennent des microcristaux de glace, et les très épais cumulonimbus. La lumière du soleil est aussi diffusée par les gouttelettes d'eau du brouillard. Ces gouttelettes reçoivent peu de lumière, et leur diamètre est de l'ordre de 5 à 10 microns contre 20 microns en moyenne pour celles des nuages. La diffusion est donc moins efficace et nous percevons une teinte grise (voir photo page 163). Mais quand ces gouttelettes sont éclairées par les phares d'une voiture, la diffusion est fortement amplifiée et le brouillard devient d'un blanc éblouissant…

Les gouttes de pluie, dont la dimension est de l'ordre du millimètre, ne diffusent pas la lumière. Leur interaction avec la lumière produit les phénomènes habituels de réflexion et de réfraction qui sont à l'origine de l'arc-en-ciel.

La diffusion par les particules en suspension dans les liquides

De nombreux liquides alimentaires contiennent de petites particules en suspension. Quand on éclaire le liquide avec un fin pinceau lumineux, la diffusion fait apparaître un faisceau visible transversalement.



Génépi mis en bouteille après macération et filtrage.

Le liquide éclairé par le soleil semble limpide. Mais dans l'obscurité, la diffusion de la lumière d'une mini-lampe à LED révèle les particules en suspension.

Les poussières déposées sur les vitres diffusent efficacement la lumière. On le voit quand on regarde à travers une vitre éclairée par le soleil, et c'est particulièrement gênant quand cette vitre est le pare-brise de votre voiture. Dans les chapitres suivants, nous rencontrerons d'autres types d'interactions de la lumière avec de petites particules de matière, et nous verrons que leurs effets dépendent beaucoup de la taille des particules.

Complément

www.lienmini.fr/39798-cpltsP224

Un peu plus de réfraction ?

La lumière nous en fait voir de toutes les couleurs

Les durs rais du soleil pénétraient dans la chambre. Chaque objet touché par la lumière était doué d'une vie intense et dure. Une assiette devenait un lac blanc. Un couteau ressemblait à une dague de glace. Les verres à boire montraient tout à coup des fêlures de lumière. Les tables et les chaises montaient à la surface, pareilles à des objets immergés recouverts d'une mince pellicule rouge, orange et mauve comme le duvet sur la peau d'un fruit mûr. Les veines sous le vernis de la porcelaine, le grain du bois, les fibres du tapis semblaient gravés en traits de plus en plus fins. Rien n'avait d'ombre.

Virginia Woolf, Les Vagues

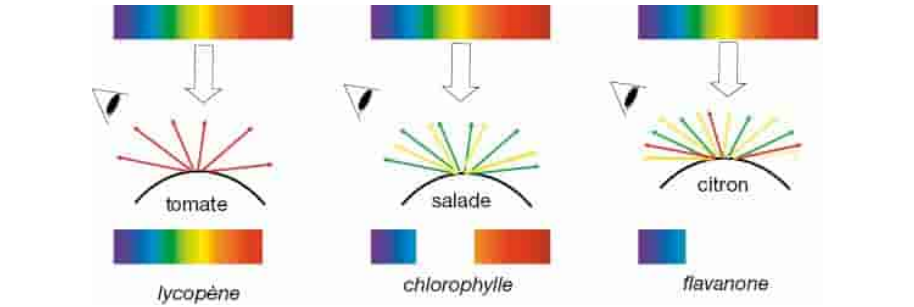
Les corps et les substances éclairés par le soleil nous paraissent colorés quand ils nous renvoient une lumière dont la *composition* a été modifiée (figure d page 213). La modification est généralement due à l'*absorption* de certaines radiations. Ce mode de production de la couleur est décrit et illustré par de nombreux exemples.

La couleur par absorption de radiations ?

Qu'est-ce qu'un pigment ?

La surface de nombreux organismes vivants possède des *pigments* qui *absorbent* certaines radiations de la lumière blanche. L'énergie des radiations absorbées est transformée en chaleur, et les radiations restantes sont diffusées dans toutes les directions. Nos yeux reçoivent la lumière diffusée et nous percevons une couleur déterminée par sa composition et par les processus physiologiques de la vision.

Les pigments végétaux



Absorption de radiations de la lumière blanche par des pigments végétaux.

Le nom des pigments et la partie du spectre qu'ils absorbent sont indiqués.

• La tomate contient du *lycopène* qui absorbe la plus grande partie du spectre visible, à l'exception des radiations de grande longueur d'onde. Celles-ci sont diffusées, et l'observateur perçoit la couleur rouge.

• Les végétaux se servent de la *chlorophylle* pour capter la lumière du soleil et convertir son énergie en énergie chimique. Ce pigment absorbe les radiations de petite et de grande longueur d'onde, et les radiations de longueur d'onde intermédiaire sont diffusées : les feuilles des végétaux sont vertes.

• L'écorce du citron contient un pigment, le *flavanone*, qui absorbe les radiations « violettes » et « bleues ». Nous percevons la couleur complémentaire, c'est-à-dire le jaune (voir complément page 248).

Les propriétés d'absorption des pigments dépendent beaucoup de leur structure, et quelques classes de pigments suffisent pour créer la grande diversité de couleurs des fleurs et des fruits.

• Les *flavonoïdes* sont des pigments de la famille des polyphénols. Ils donnent les couleurs jaune ou crème que l'on observe chez de nombreuses fleurs. Le flavanone du citron est un flavonoïde.

Le coquelicot et le bleuet sont deux plantes messicoles.

La gagée de Liotard est une fleur des pelouses de l'étage subalpin.

• Les *anthocyanes* donnent des couleurs rouge, rose, bleu, violet et pourpre. Ce sont elles qui colorent les « fruits rouges » comme la fraise, la framboise, la mûre, le cassis, la myrtille. La couleur de certaines anthocyanes dépend de l'acidité du milieu. L'exemple classique est celui du coquelicot et du bleuet : leurs pétales contiennent le même anthocyane, mais la sève du coquelicot est acide (pH voisin de 3), alors que celle du bleuet est neutre (pH voisin de 7).

• Les *caroténoïdes* donnent des couleurs rouge et orangée : le carotène colore les carottes, le lycopène colore la tomate et le poivron rouge. Le poivron jaune doit sa couleur à un flavonoïde et le poivron vert à la chlorophylle.

Mais aussi…

Les plantes messicoles

Ces « fleurs des champs » sont arrivées chez nous avec les céréales, vers 6 000 ans avant J.-C. Elles ont longtemps agrémenté de couleurs vives les champs cultivés de nos campagnes et étaient très appréciées des insectes butineurs. Certains agriculteurs s'efforcent de les éliminer en pratiquant des labours profonds et en répandant des herbicides. Dans les régions de culture intensive, l'évolution des pratiques agricoles a fait disparaître de nombreuses plantes messicoles. Paradoxalement, ce

sont les cultivateurs « bio », soumis à des contraintes qui diminuent les rendements, qui sont les plus tolérants. Tout dépend de l'idée que l'agriculteur se fait de son rôle.

Le sabot-de-Vénus (*Cypripedium calceolus*).

En automne, les arbres à feuilles caduques changent de couleur. Les feuilles contiennent deux pigments impliqués dans la photosynthèse : la chlorophylle et les caroténoïdes. Quand la feuille est vivante, les nombreuses chlorophylles imposent leur couleur. Mais en automne, ces molécules se décomposent les premières, et la couleur due aux carotènes apparaît avant la chute des feuilles.

La palette de couleurs des végétaux s'enrichit en octobre.

La synthèse de pigments par les plantes constitue une dépense énergétique importante, et on peut penser que la coloration des fleurs et des fruits leur est utile. De nombreuses études ont montré que la couleur et le parfum des fleurs attiraient les insectes pollinisateurs qui, en prélevant le nectar, transportent le pollen d'une fleur vers le pistil d'une autre. Ils contribuent ainsi involontairement à la reproduction des plantes. La couleur et le goût des fruits attirent les animaux qui les consomment, qui participent à leur manière à la dissémination des graines.

Roches, minéraux et pierres précieuses

Alors que la couleur des fleurs est un stratagème des plantes, celle des minéraux est due au hasard. Les roches sont constituées de minéraux généralement noirs, blancs ou gris, et elles sont souvent assez ternes. Celles qui sont colorées sont souvent exploitées à des fins

ornementales sous le nom générique de « marbres ».

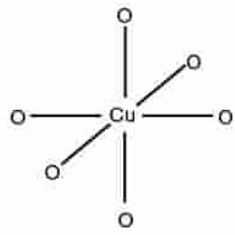
Dans les Alpes, les massifs de « roches vertes » sont des restes du plancher de l'ancien océan alpin. Parmi elles, la serpentinite, une belle roche noire et verte parfois veinée de blanc, a été longtemps exploitée de façon artisanale dans des carrières situées en altitude.

Bloc de « marbre vert » en place dans une ancienne carrière, et fragment d'une plaque polie.

Le socle du tombeau de Napoléon aux Invalides a été taillé dans cette roche.

La couleur des minéraux est due à des *ions métalliques* comme Ti^{3+}, V^{3+}, Cr^{3+}, Fe^{2+} et Fe^{3+}, Co^{2+}, Cu^{2+}. Ces ions font parfois partie intégrante du minéral, mais ils sont plus souvent présents à l'état d'impuretés.

• L'azurite et la malachite sont deux carbonates de cuivre hydratés, de formules respectives $Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$ et $Cu_2CO_3(OH)_2$. Dans ces minéraux, les ions Cu^{2+} sont liés à six atomes d'oxygène.



Croûte d'azurite bleue sur du grès. Les parties vertes sont en malachite.

À droite : coordination d'un ion Cu^{2+} par six ions oxygène.

C'est l'absorption de certaines radiations par les ions Cu^{2+} qui est responsable de la couleur bleue de l'azurite, verte de la malachite. La différence de couleur des deux minéraux est due à une liaison Cu-O un peu plus longue dans l'azurite. C'est donc ici un atome constitutif du minéral, le cuivre, qui est responsable de la couleur. Si on broie un échantillon cristallisé, on obtient une poudre qui a la même couleur. C'est aussi le cas des ocres, qui sont principalement constitués de deux oxydes de fer : la goethite, de formule FeO(OH), et l'hématite, de formule Fe_2O_3. La couleur jaune de la goethite et la couleur rouge de l'hématite sont dues à l'absorption de radiations par les ions Fe^{3+}, et la différence de couleur est due ici aussi à des différences de structure.

• La plupart des minéraux sont incolores quand ils sont purs, mais c'est rarement le cas dans la nature : ils contiennent souvent en inclusion des impuretés, en particulier des ions métalliques qui leur donnent de belles couleurs. C'est par exemple le cas du béryl, un silicate d'aluminium et de béryllium. Quand il contient des ions Cr^{3+} ou V^{3+}, le béryl devient vert et s'appelle alors… une *émeraude* ! Quand il contient des ions Fe^{2+}, il est bleu et c'est une *aigue-marine*. Le corindon est un oxyde d'aluminium incolore. Il devient rouge quand il contient des ions Cr^{3+} et s'appelle alors un *rubis*. Quand ce sont des paires (Fe^{3+}, Ti^{3+}), il est bleu et c'est un *saphir*. Si on écrase finement ces minéraux, on obtient une poudre *blanche*. En effet, la concentration des impuretés responsables de leur couleur est tellement faible que la poudre diffuse la plus grande partie de la lumière blanche sans modifier sa composition. Quand les minéraux colorés sont de bonne qualité, on peut les tailler pour magnifier leur éclat et leur couleur. La taille a pour but d'allonger le trajet de la lumière dans le cristal pour favoriser l'absorption par les ions métalliques, et de renvoyer les radiations non absorbées dans la direction de la lumière incidente, comme dans le cas du diamant (voir figure page 217).

Rubis : cristal brut et cristal synthétique.

Mais aussi…

La classification des gemmes

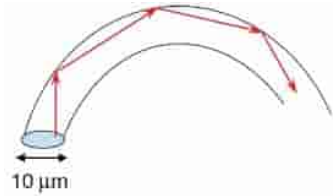
– Pierres *précieuses* : diamant, rubis, saphir et émeraude.

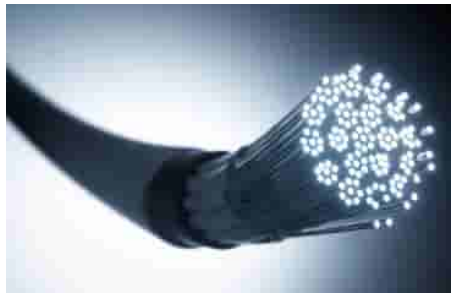
– Pierres *fines* : les autres gemmes transparentes ou translucides comme l'aigue-marine, la topaze, le chrysobéryl, la tourmaline, l'améthyste, le zircon, l'opale, etc.

– Pierres *ornementales* translucides ou opaques : jade, turquoise, lapis-lazuli, agate, jaspe, etc.

Le cas du verre

Le verre des vitres et des bouteilles est constitué d'environ 70 % de silice (SiO_2), auxquels s'ajoutent des oxydes de sodium et de calcium. Ce verre est très transparent aux radiations dont la longueur d'onde est comprise entre 300 et 2 000 nm (UV A, spectre visible et infrarouge proche). Par contre, il absorbe fortement les UV B et tout l'infrarouge moyen et lointain. C'est, bien sûr, la grande transparence du verre aux radiations « visibles » qui lui vaut d'être utilisé depuis longtemps comme vitrage. On peut le colorer en incorporant une faible proportion d'oxydes métalliques qui absorbent certaines radiations. Les maîtres verriers du Moyen Âge étaient experts en la matière, et on fait actuellement des verres de toutes les couleurs à l'échelle artisanale et industrielle. Le verre des bouteilles destinées aux liquides alimentaires est parfois coloré : l'ajout d'ions Fe^{2+} rend les bouteilles de vin vertes, l'ajout d'ions Fe^{3+} donne aux bouteilles de bière une couleur ambrée. Cette coloration avait pour but de protéger les liquides de la lumière, mais il semble que son rôle actuel soit plutôt de les mettre en valeur.





© Getty Images

La fibre optique. À gauche, réflexion totale dans une fibre. À droite, faisceau de fibres.

Le verre pur est très transparent à la lumière « visible », mais il l'absorbe tout de même faiblement. Cette absorption se manifeste quand la lumière doit traverser une grande épaisseur de verre, ce qui se produit dans les *fibres optiques*. Pour transmettre les signaux de la radio, de la télévision, du téléphone ou du réseau Internet, on utilise différents supports : de simples fils de cuivre, des câbles coaxiaux, et les ondes hertziennes qui se propagent dans l'air. Et depuis peu, la fibre optique qui permet de transmettre de très grands débits d'information. Les signaux s'y propagent sous forme de radiations lumineuses à l'intérieur de longues fibres de verre, fines et flexibles. Elles y restent confinées grâce à la réflexion totale, mais finissent par s'atténuer par absorption sur de longues distances. Il faut alors les amplifier, une opération compliquée et coûteuse. Avec le verre ordinaire et les radiations du spectre visible, il faudrait la répéter trop souvent. On se sert donc de fibres en silice quasi pure dans laquelle se propage une *radiation infrarouge*.

On trouve des verres dans la nature. L'obsidienne est une roche foncée, souvent noire, constituée surtout de silice (environ 70 %), qui se forme dans les coulées des laves acides comme la rhyolite. Les obsidiennes noires contiennent de la magnétite de formule Fe_3O_4 qui absorbe toutes les radiations du spectre visible. Ces roches ont été exploitées au Néolithique pour fabriquer des lames très coupantes et des bijoux. À cette époque, les obsidiennes des îles volcaniques d'Italie faisaient l'objet d'un véritable commerce en Méditerranée.

Fragment et galets roulés d'obsidienne.

Les substances blanches

Si on broie finement un morceau de verre jusqu'à obtention d'une poudre, les minuscules fragments réfléchissent les radiations de la lumière « visible » sans les absorber, et la poudre les diffuse dans toutes les directions : elle est *blanche* (figure b page 213). Il n'est pas nécessaire de broyer le verre pour connaître la couleur de sa poudre, il suffit de le rayer avec un couteau : la surface rugueuse de la rayure diffuse la lumière et le trait est *blanc*. On observe la même chose quand on raye un morceau de glace. La couleur du *trait* sert à identifier les minéraux.

De façon générale, les substances constituées d'une multitude de très petits éléments qui absorbent peu les radiations du spectre visible et les réfléchissent dans toutes les directions, sont *blanches*. C'est le cas du sel, de la farine, de la neige et du papier. Le papier est fait d'un enchevêtrement de minuscules fibres de *cellulose*. On fait actuellement la pâte à papier avec le bois, constitué de cellulose et de lignine de couleur jaune ou marron, et on la « blanchit » en éliminant la lignine par un traitement chimique approprié.

Mais aussi…

Les vrais inventeurs de la pâte à papier

Depuis des dizaines de millions d'années, les *guêpes sociales* fabriquent de la pâte à papier pour bâtir leur nid. Elles rognent des fragments de fibres de bois en décomposition avec leurs mandibules et les mélangent à leur salive. Ce matériau sert à construire les alvéoles hexagonales où sont pondus les œufs, ainsi que les fines enveloppes qui les protègent.

Quand une substance faiblement colorée est battue énergiquement,

elle incorpore une multitude de petites bulles d'air qui diffusent très efficacement la lumière, et elle devient *blanche*. C'est le cas de l'écume qui se forme quand une vague déferle sur la plage et quand un torrent dévale en cascade. La crème vert pâle qui sort d'un tube de crème à raser devient blanche quand on la fait mousser sur la peau. Et on bat vigoureusement les blancs d'œuf jaunâtres pour les faire « monter en neige ».

L'écume des torrents.

Une remarque pour conclure cette section. Nous attribuons aux objets la couleur perçue en *lumière blanche*. En réalité, leur couleur dépend de toutes les lumières qu'ils reçoivent : celles du soleil, des nuages, du ciel, et les lumières diffusées par tout ce qui les entoure. Nous n'en sommes pas conscients, mais les appareils nous le rappellent : les photos prises en forêt ont une dominante verte due au feuillage, et celles prises à l'ombre sous un ciel dégagé ont une dominante bleue.

Quelle est la couleur de l'eau pure ?

Curieuse question, penseront certains en buvant un verre d'eau. Ne dit-on pas d'un raisonnement qu'il est « limpide comme de l'eau de roche » et d'une pierre précieuse qu'elle est « de la plus belle eau » ? C'est, bien sûr, sa transparence qui fait de l'eau un symbole de pureté. Et pourtant, les molécules d'eau absorbent un peu les radiations de grande longueur d'onde du spectre visible. Cette absorption est trop faible pour colorer l'eau d'un verre, mais quand la lumière du soleil traverse plusieurs mètres d'eau, elle s'appauvrit suffisamment en radiations rouges pour se colorer. Si on plonge à plusieurs mètres de

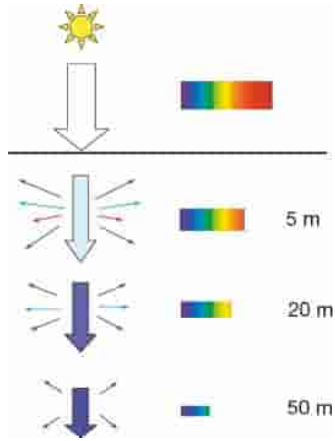
profondeur et que l'on regarde vers la surface, on voit la lumière du soleil légèrement bleutée. Le bleu est naturellement plus intense si on descend plus bas.

La diffusion moléculaire

La mer, d'un bleu intense au large de Marseille, devient bleu-vert près du port.

On pourrait penser que ce qui précède explique pourquoi les océans sont bleus. Mais pour que la lumière devenue bleutée en pénétrant dans l'eau arrive à nos yeux, il faut qu'un autre phénomène la renvoie vers la surface. Ce phénomène, c'est la *diffusion moléculaire*. Nous avons vu que les particules plus grandes que la longueur d'onde des radiations diffusent la lumière du soleil sans modifier sa composition. Les molécules d'eau sont beaucoup plus petites que cette longueur d'onde, et elles diffusent les radiations *de façon sélective* : les radiations de courte longueur d'onde sont beaucoup plus diffusées que les autres.

Quand la lumière du soleil pénètre dans l'eau, les molécules d'eau *absorbent* les radiations de grande longueur d'onde et *diffusent* toutes les radiations, celles de courte longueur d'onde étant les plus diffusées.



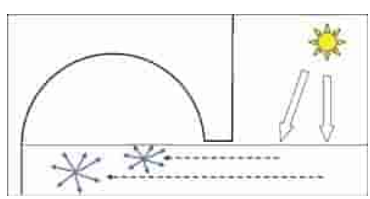
Représentation schématique de l'effet de la profondeur sur la composition de la lumière directe et sur les radiations diffusées.

La lumière *directe* est représentée par des flèches pleines et sa composition est indiquée à droite. Les autres flèches représentent les radiations *diffusées*. Les profondeurs indiquées ne sont qu'indicatives.

En progressant dans l'eau, la lumière directe devient de plus en plus « bleue », et la lumière diffusée s'enrichit progressivement en radiations « bleues ». Au-delà d'une cinquantaine de mètres, il ne reste plus que des radiations « bleues » dans la lumière directe et dans la lumière diffusée : c'est « le grand bleu ». Mais au-delà de quelques centaines de mètres, toutes les radiations sont absorbées et c'est « le grand noir ».

Les grottes bleues

Il existe sur le littoral des grottes dont l'entrée est sous-marine ou affleurante. Ni la lumière du soleil, ni celle du ciel n'y pénètrent. Pourtant, à l'intérieur, l'eau et les parois sont éclairées par de la lumière *bleue*. Cette lumière arrive *de l'eau* après avoir parcouru un trajet au cours duquel elle s'est appauvrie en radiations de grande longueur d'onde (figure ci-après). La grotte bleue de Capri reçoit chaque année de nombreux visiteurs, mais il en existe beaucoup d'autres, dont une plus discrète dans le parc national des Calanques. Ces grottes démontrent de façon spectaculaire que la lumière devient *bleue* après avoir traversé une grande épaisseur d'eau.



© Getty Images

Grotte éclairée par de la lumière bleue. À droite, la célèbre grotte de Capri.

Quand nous regardons un plan d'eau de haut, nos yeux reçoivent la lumière diffusée qui sort de l'eau. Si l'eau est profonde, cette lumière comporte beaucoup de « radiations bleues » et nous voyons la surface bleue. C'est le cas de la mer au large (photo page 237) et du lac des Neuf Couleurs (photo a ci-dessous). Mais si la profondeur est faible, par exemple inférieure à 5 mètres, le schéma de la page précédente montre que la lumière diffusée comporte beaucoup de « radiations vertes » et la surface est bleu-vert. Sur la photo b ci-dessous, la limite nette entre le bleu-vert et le bleu marque l'augmentation rapide de la profondeur, qui passe rapidement de quelques mètres à quelques dizaines de mètres.

Le lac des Neuf Couleurs en Haute-Ubaye et le lac d'Annecy en Haute-Savoie.

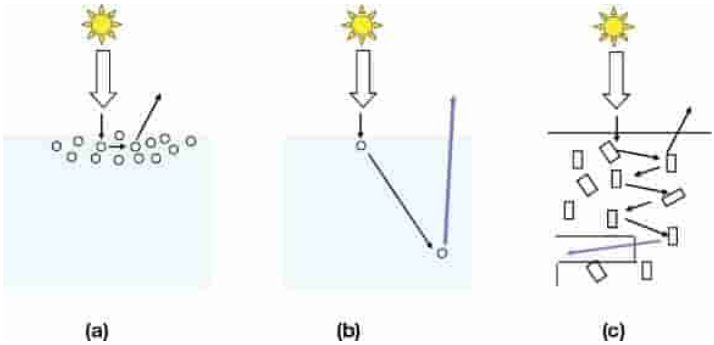
Les choses se compliquent quand l'eau contient des particules en suspension. Si leur concentration est faible, elles accentuent la couleur

bleue de l'eau. Mais si elles sont concentrées, elles diffusent une grande partie de la lumière directe avant que celle-ci ne soit devenue nettement bleutée : le bleu domine moins dans la lumière diffusée et l'eau paraît bleu-vert ou même verte. C'est le cas près des ports, mais aussi dans les mers froides riches en phytoplancton. Quand les particules en suspension absorbent certaines radiations, elles peuvent imposer leur couleur. On le voit à l'embouchure des fleuves où l'eau est chargée de limon.

Quand nous sommes sur le rivage, nos yeux reçoivent très peu la lumière « bleutée » qui sort de l'eau. Ils reçoivent surtout la lumière *réfléchie par la surface*, qui provient de ce qui est en face de nous. C'est encore plus vrai quand le plan d'eau est à l'ombre (photos de la page 219). Nous ne voyons alors que les reflets, y compris celui du ciel.

Quelle est la couleur de la glace et de la neige ?

La glace pure qui se forme lentement et sans contraintes est transparente. Mais ces conditions sont rarement remplies. Quand on place un récipient rempli d'eau dans le congélateur pour faire des glaçons, la glace forme d'abord une couche transparente. Mais sa dilatation crée des contraintes, et des craquelures apparaissent. De plus, l'air dissous dans l'eau s'accumule sous forme de bulles. Les craquelures et les bulles d'air diffusent très efficacement la lumière, et la glace se comporte optiquement comme une poudre : le glaçon est *blanc*, avec des bords transparents. La glace des glaciers provient de la compression de la neige qui s'est accumulée pendant de nombreuses années. L'air contenu dans la neige se trouve piégé dans la glace sous forme de nombreuses bulles qui diffusent la lumière, et cette « jeune glace » est blanche (figure a page suivante). La compression prolongée de la glace finit par chasser les bulles d'air. Le trajet de la lumière dans la glace devient alors assez long pour que les radiations de grande longueur d'onde soient en partie absorbées par les molécules d'eau, et la lumière qui émerge de cette « vieille glace » est bleutée (figure b et photos de la page suivante).



Représentation schématique du trajet de la lumière dans la glace jeune (a) et vieille (b), et dans la neige (c).

Les cascades de glace, formées par l'agrégation de nombreuses stalactites géantes, ont aussi parfois une teinte bleutée.

Photo 1 Frauke Baymann

La glace bleutée.

À gauche, un glacier de Patagonie ; à droite, une cascade de glace. (Comparez avec la neige blanche en haut à droite de la photo.)

La neige est-elle toujours blanche ?

À nouveau une question saugrenue ! Ne dit-on pas « blanc comme neige » ? La *surface* de la neige « propre » est, bien sûr, blanche : la plus fine couche contient une multitude de cristaux de glace dont les faces réfléchissent la lumière sans l'absorber, donnant ainsi une surface blanche et brillante. Mais si la couche est épaisse, les

radiations de grande longueur d'onde de la lumière qui y pénètre sont suffisamment absorbées pour que la lumière devienne bleutée (figure c ci-dessus). On le vérifie en creusant un trou dans de la neige un peu tassée (photo page suivante).

Lueur bleutée dans une cavité creusée dans la neige.

Comment les animaux sont-ils colorés ?

De nombreux poissons, oiseaux, batraciens, reptiles et insectes sont brillamment colorés, et leurs couleurs sont généralement dues à des pigments qui absorbent sélectivement certaines radiations. Mais les animaux peuvent se colorer d'une autre façon : certaines parties de leurs corps possèdent des *structures* particulières, qui, éclairées en lumière blanche, produisent des couleurs iridescentes, c'est-à-dire qui varient selon l'angle d'observation. On parle alors de couleurs *structurelles*.

Un festival de couleurs…

Les flamants roses doivent leur couleur à un pigment *végétal* de type caroténoïde. Il est synthétisé par une algue dont se nourrissent les petites crevettes que mangent les flamants.

… dans le monde animal.

Les papillons (ici, une Petite tortue) et le lézard vert sont colorés par des pigments, mais certaines de leurs couleurs sont d'origine « structurelle ».

• La première structure est un empilement régulier de fines couches dont la séparation est de l'ordre de la longueur d'onde des radiations lumineuses, c'est-à-dire le micron. Les interférences des radiations réfléchies par les différentes couches produisent des irisations semblables à celles des films d'huile, des bulles de savon et des disques compacts. C'est ce type de structure qui produit les irisations de la nacre, des élytres vert métallique des scarabées, et de certaines parties des ailes de papillons et des plumes d'oiseaux.

Les magnifiques couleurs des ocelles du paon mâle sont d'origine structurelle.

• L'autre structure est une surface couverte de microparticules plus petites que la longueur d'onde des radiations lumineuses. La lumière blanche subit la diffusion moléculaire et la surface renvoie une lumière bleue. Sur la photo en haut de page, la couleur verte du lézard vient de la superposition des radiations diffusées par des pigments jaunes et de la lumière bleue diffusée par des microcristaux. La gorge dépourvue de pigments est bleue.

Quelles couleurs perçoivent les animaux ?

Les yeux des vertébrés sont semblables aux nôtres. Leur rétine comporte des cônes, mais le nombre de types de cônes varie selon les espèces. Les données concernant les photorécepteurs des insectes, qui jouent le même rôle que les cônes dans la perception des couleurs, figurent aussi ci-dessous.

Types de cônes ou de photorécepteurs présents dans l'œil des animaux.

Les mammifères nocturnes, ou qui vivent dans la quasi-obscurité, possèdent un seul type de cônes, sensible à la luminosité. La plupart des mammifères en possèdent deux, ce qui leur donne une perception réduite des couleurs. Les yeux leur servent surtout à détecter les *mouvements*, et pour les détails, ils se fient davantage à leur odorat et à leur ouïe. Ce n'est pas la couleur de la muleta du toréador qui excite le taureau, mais les mouvements qu'il lui imprime. La rétine des marsupiaux et des primates d'Afrique et d'Asie (singes et lémuriens) possède trois types de cônes semblables aux nôtres, et ces animaux perçoivent sans doute les couleurs comme nous. Les poissons, les reptiles, les batraciens, les oiseaux et les papillons possèdent une fenêtre de vision bien plus large que la nôtre. Leur œil possède en effet un quatrième type de cônes, sensible aux radiations UV de longueur d'onde comprise entre 300 et 400 nm.

Le cas des abeilles

L'éthologue autrichien Karl von Frisch, Prix Nobel 1973, a beaucoup étudié le comportement des abeilles, en particulier leur perception des couleurs. Comme de nombreux insectes, les abeilles possèdent des cônes « bleus », « verts » et « UV ». Une fleur de couleur rouge pur est perçue comme étant grise. Mais il existe très peu de fleurs de cette couleur dans nos contrées : la bruyère, le rhododendron et le cyclamen sont *pourpres*, une couleur qui résulte de la superposition de radiations « bleues » et « rouges » (voir complément page 248), et les abeilles les voient *bleutées*.

Rhododendron.

Elles ne perçoivent pas le rouge du coquelicot, mais celui-ci diffuse des radiations « UV » auxquelles les abeilles sont sensibles. Leurs cônes « UV » leur permettent aussi de différencier des fleurs qui nous paraissent du même jaune, mais qui ne diffusent pas les radiations « UV » de la même manière. Signalons que les fleurs d'un rouge éclatant des régions tropicales ne sont pas pollinisées par des insectes, mais par des colibris !

Mais aussi…

L'opinion de Karl von Frisch sur le rôle des fleurs

« Celui qui pourrait considérer le monde avec les yeux de l'abeille serait surpris de découvrir près du double d'espèces de fleurs que ne le découvre par ses propres moyens notre œil aveugle aux ultraviolets […]. Celui qui aime la nature n'aura pas moins de plaisir à voir les fleurs s'il reconnaît qu'elles ont été faites pour d'autres yeux que les siens. »

Canards colvert.

Quelques réflexions sur le rôle de la couleur dans le monde animal

L'exemple des oiseaux montre qu'il est difficile d'énoncer des généralités sur ce sujet. Chez de nombreux oiseaux comme les canards, les tétraonidés et de nombreux passereaux, le mâle est nettement plus coloré que la femelle. L'explication habituelle est que le mâle doit séduire une femelle et chanter de façon bien visible pour défendre son territoire, alors que la femelle doit se montrer discrète pendant la couvaison. Pour l'appuyer, on cite le cas d'espèces comme la mésange charbonnière et la mésange bleue, chez qui mâle et femelle sont pareillement colorés, et qui nichent dans des cavités. On fait aussi remarquer que chez les oiseaux qui nichent en colonie, le chant territorial n'existe pas et que les deux sexes ont le même plumage, pas ou peu coloré.

Mais des espèces comme le chardonneret élégant et le geai des chênes, où mâle et la femelle portent la même livrée colorée, ne nichent pas dans des cavités. Et chez des espèces où les deux sexes ont le même plumage assez terne, le mâle chante parfois avec vigueur. C'est le cas du rossignol philomèle.

Le camouflage est une stratégie très répandue dans le monde animal. Le lagopède alpin, le lièvre variable et l'hermine, qui vivent en montagne, vont jusqu'à adopter une livrée blanche à l'approche de l'hiver. On pourrait penser que les espèces « gibiers » et les espèces « chasseurs » ont intérêt à porter des couleurs neutres pour se fondre dans le paysage. C'est ce que fait parfaitement l'araignée que l'on devine à peine sur la première photo ci-dessous. Mais ce n'est pas l'opinion de l'araignée crabe qui a décidé de capturer les insectes qui fréquentent les sabots-de-Vénus (deuxième photo ci-dessous) : son corps reproduit exactement les couleurs jaune et pourpre du labelle et des pétales de la belle orchidée, et ses pattes sont vertes comme la tige et les feuilles : un sabot miniature !

Les stratégies de camouflage étonnantes de deux espèces d'araignées.

Complément

www.lienmini.fr/39798-cpltsP246

La synthèse des couleurs

Les jeux du soleil et de l'atmosphère

« Tous regardaient le globe qui, se mouvant obliquement à l'horizon, descendit encore, et resta comme suspendu un instant sur l'abîme. Puis, la déformation du disque, modifié par la réfraction, se fit peu à peu sentir ; il s'élargit au détriment de son diamètre vertical et rappela la forme d'un vase étrusque, aux flancs rebondis, dont le pied plongeait dans l'eau […]. Bientôt, le soleil disparut à demi derrière la ligne horizontale. Enfin, il n'y eut plus qu'un mince segment de l'arc supérieur à l'affleurement de la mer. «Le Rayon-Vert ! Le Rayon-Vert !» s'écrièrent d'une commune voix les frères Melvill, Bess et Partridge, dont les regards, pendant un quart de seconde, s'étaient imprégnés de cette incomparable teinte de jade liquide. »

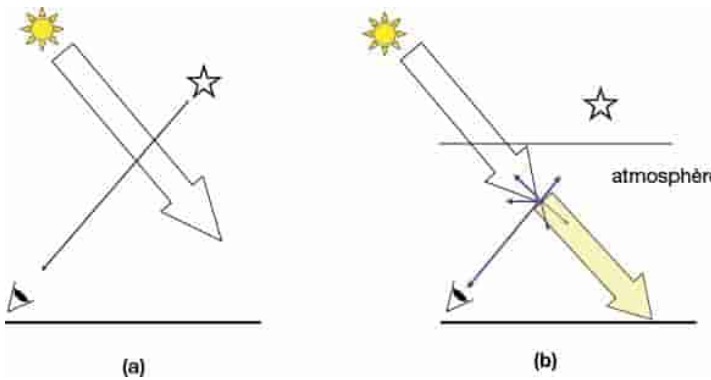
Jules Verne, Le rayon vert

L'atmosphère est très transparente à la lumière : en montagne, la vue s'étend souvent à plus d'une centaine de kilomètres, et nous voyons dans le ciel les avions voler à 10 km d'altitude. La nuit, ce sont la Lune et les étoiles. On pourrait donc penser que la lumière traverse l'atmosphère en ligne droite, sans être déviée ni modifiée. Si c'était le cas, le ciel ne serait pas bleu, nous serions privés des apparitions de l'arc-en-ciel et du spectacle des couchers de soleil, et Jules Verne n'aurait jamais écrit *Le Rayon vert*. Bref, les spectacles variés et colorés que nous offrent les jeux de la lumière du Soleil avec l'atmosphère disparaîtraient.

Le ciel est-il toujours bleu ?

En absence de soleil, la nuit ou lors des éclipses de soleil, le ciel est *noir* et on voit les étoiles. Et s'il n'y avait pas d'atmosphère, le ciel serait toujours noir et un phare géant nous éclairerait pendant la journée (figure a ci-dessous). Dans l'album *On a marché sur la Lune*, Hergé a pris soin de représenter le ciel noir pendant la « journée

lunaire » et tout paraît très contrasté. Le bleu du ciel est dû à l'interaction de la lumière du Soleil avec l'atmosphère. Mais en quoi consiste cette interaction ? En 1871, un physicien anglais, lord Rayleigh, a montré que les radiations lumineuses étaient diffusées de façon sélective par les molécules de l'air, celles de courte longueur d'onde étant nettement plus diffusées que les autres (voir le premier complément page 271). C'est le phénomène de la *diffusion moléculaire*, que nous avons déjà évoqué pour expliquer la couleur bleue des océans. La lumière diffusée par les molécules de l'air, dans laquelle les radiations « bleues » dominent, est perçue bleue, et la lumière directe, légèrement appauvrie en radiations violettes et bleues, paraît un peu jaune (figure b).



Effet de l'atmosphère sur la vision du ciel pendant la journée.

(a) En absence d'atmosphère, l'observateur dos au soleil ne reçoit que la lumière des étoiles.
(b) Les molécules de l'air diffusent une partie de la lumière du soleil. Les radiations « bleues » sont plus diffusées que les « rouges » et l'observateur perçoit une couleur bleue qui masque les étoiles.

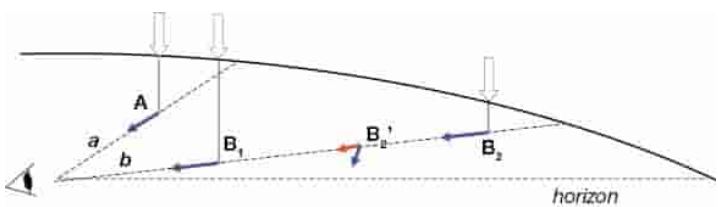
La lumière diffusée est aussi enrichie en radiations « violettes », mais il y en a beaucoup moins que de « bleues » dans la lumière du soleil, et notre œil est peu sensible aux radiations « violettes » : on distingue mal le violet dans l'arc-en-ciel.

Le bleu du ciel est donc dû à la diffusion moléculaire. Mais ce bleu n'est pas uniforme : assez foncé au zénith, en particulier en montagne, il s'éclaircit vers l'horizon, où le ciel devient blanc.

Le dégradé du bleu du ciel vers l'horizon.

La photo a été prise vers l'ouest en milieu de journée.

Pour comprendre l'origine de ce dégradé, examinons le schéma ci-dessous.



Origine du dégradé du bleu du ciel. Le soleil est *au zénith*.

Les flèches larges représentent la lumière qui arrive sur l'atmosphère, les traits fins son trajet avant la diffusion. Les flèches fines représentent les radiations diffusées dans les directions en pointillé. Leur couleur indique la radiation diffusée dominante.

Quand nous regardons le ciel dans une certaine direction, notre œil reçoit les radiations diffusées par les molécules d'air situées dans cette direction.

• Quand elle est haute dans le ciel (direction *a*), la lumière diffusée en A, dans laquelle les radiations bleues dominent, traverse une faible épaisseur d'air et arrive sans grande modification.

• Quand elle est basse vers l'horizon (direction *b*), les radiations comme celles diffusées en B_1 traversent une faible épaisseur d'air, mais d'autres, comme celles diffusées en B_2, traversent une grande épaisseur et peuvent subir *une nouvelle diffusion* en B_2'. Cette deuxième diffusion

appauvrit la lumière diffusée en radiations « bleues », et les radiations « rouges » deviennent dominantes. La superposition des radiations issues de B_1 et de B_2' produit une lumière dans laquelle le bleu domine moins que dans la lumière qui arrive dans la direction *a*.

Quand on abaisse le regard vers l'horizon, la proportion de radiations qui ont subi une *diffusion multiple* augmente dans la lumière reçue, et son bleu s'éclaircit jusqu'à devenir blanc à l'horizon.

La visibilité des lointains et la « brume bleue »

Quand on regarde les reliefs lointains, les montagnes paraissent d'autant plus claires et bleutées qu'elles sont plus éloignées, et elles disparaissent quand le contraste avec le ciel devient trop faible.

La « brume bleue ».

Cet effet est tellement banal que les peintres et les dessinateurs s'en servent pour donner de la *profondeur* à leurs paysages. Mais quelle est son origine ? Les objets éloignés nous envoient de la lumière. Mais à cette lumière s'ajoute celle qui est diffusée par les molécules et les microparticules de la couche d'air qui nous sépare d'eux. Cette lumière bleuit et éclaircit ces objets d'autant plus qu'ils sont éloignés, ce qui limite la visibilité à grande distance. L'intensité de cette « brume bleue » dépend beaucoup de l'état de l'atmosphère. Quand le taux d'humidité de l'air dépasse environ 75 %, des microgouttelettes commencent à s'agglomérer sur les microparticules en suspension, les aérosols. Ce n'est pas encore la condensation, mais les microparticules ainsi grossies diffusent beaucoup plus la lumière. Les végétaux participent activement à ce processus : ils émettent de nombreux composés organiques, dont certains se condensent facilement en formant des aérosols. Les grandes forêts favorisent donc la formation de la brume bleue. Ce phénomène est à l'origine de l'appellation de plusieurs montagnes, comme les Blue Ridge Mountains des Appalaches, les montagnes Bleues en Australie et la célèbre « ligne

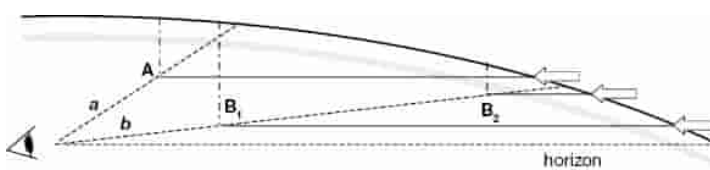
bleue des Vosges » en France.

Un festival de couleurs au soleil levant et au soleil couchant

Quand le soleil se lève et se couche, sa lumière nous arrive après avoir traversé une épaisseur d'air beaucoup plus grande que lorsqu'il était au zénith (voir deuxième complément page 271). Toutes ses radiations ont été plus ou moins diffusées, et l'intensité est très atténuée. Les radiations « violettes » et « bleues » ont quasiment disparu, et nous voyons le soleil jaune ou orangé.

Coucher de soleil sur l'île de Port-Cros.

Mais c'est bien sûr l'aspect du *ciel* qui est le plus modifié. Au-dessus de nous, le bleu paraît inchangé. Mais vers l'ouest au coucher, vers l'est au lever, on observe de somptueux dégradés de couleurs, du bleu à l'orangé jusqu'au rouge à l'horizon. L'origine de ce dégradé apparaît sur la figure ci-dessous.



Origine du dégradé de couleurs du ciel au lever et au coucher du soleil.

Les directions d'observation sont les mêmes que sur le schéma de la page 251, mais la lumière directe arrive maintenant horizontalement (traits continus). La bande grise représente la couche d'ozone de la stratosphère qui absorbe faiblement les radiations rouges.

On y retrouve les directions *a* et *b* du schéma de la page 251 et les points A, B_1 et B_2 où la lumière directe du soleil est diffusée. Cette lumière, qui arrivait verticalement quand le soleil était au zénith (points-tirets), arrive horizontalement quand il est sur l'horizon (traits continus). Son trajet est maintenant beaucoup plus long (la figure n'est pas du tout à l'échelle) et la lumière directe est très appauvrie en

radiations « violettes » et « bleues », si bien que la proportion des radiations orangées et rouges dans la lumière *diffusée* augmente dans toutes les directions d'observation. C'est ce supplément de rouge et d'orangé qui transforme le dégradé *du bleu au blanc* observé quand le soleil est haut dans le ciel (photo de la page 251), en un dégradé *de couleurs* au lever et au coucher du soleil.

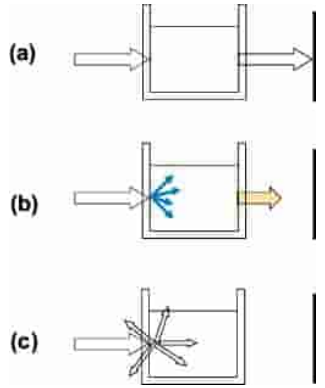
Quand le soleil est sur l'horizon, un autre phénomène renforce le bleu au-dessus de nous. La couche d'ozone de la stratosphère absorbe faiblement les radiations du spectre visible du Soleil, préférentiellement les « rouges ». L'absorption est maximale quand l'épaisseur d'ozone traversée est la plus grande, c'est-à-dire au lever et au coucher du soleil. Elle compense l'effet de la diffusion qui favorise les radiations « rouges » à ce moment-là.

Les détails de l'aspect du ciel au lever et au coucher du soleil dépendent beaucoup de l'état de l'atmosphère, en particulier de la présence de nuages dont les gouttelettes diffusent la lumière sans modifier sa composition. S'ils sont assez fins, la superposition du rouge orangé qu'ils diffusent et du bleu du ciel donne une teinte pourpre ou rose. Mais s'ils sont trop épais, ils font disparaître le spectacle. Quand la brume flotte au-dessus de la mer, ses gouttelettes amplifient considérablement la diffusion et rougissent uniformément le ciel.

Un coucher de soleil dans un verre d'eau

C'est une expérience facile à réaliser : il suffit d'un verre d'eau, d'une mini-lampe à LED, d'une feuille de papier blanc et d'un peu de lait demi-écrémé. Il est préférable que le verre soit de section carrée pour que le faisceau lumineux de la lampe traverse des faces planes et parallèles. L'expérience a lieu dans l'obscurité.

Quand on éclaire le verre, la lumière invisible traverse l'eau, sort par la face opposée et éclaire l'écran de papier (figure a ci-dessous). Si on ajoute une cuillerée de lait dans l'eau et qu'on mélange, un faisceau apparaît (figure b). Il est bleuté à l'entrée et la tache sur le papier devient orangée. L'explication est la suivante : les caséines, les protéines du lait, sont plus petites que la longueur d'onde des radiations du spectre visible, et elles les diffusent comme les molécules de l'eau et de l'air : les radiations bleues sont davantage diffusées que les rouges. On voit les radiations bleues diffusées latéralement, et le faisceau direct appauvri en radiations bleues colore le papier en orangé. Si on ajoute plusieurs cuillerées de lait, le liquide devient opaque et blanc comme… du lait (figure c).



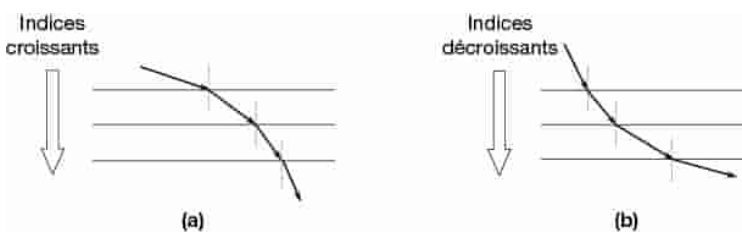
Le coucher de soleil dans un verre d'eau.

En effet, quand la concentration des protéines dépasse une certaine valeur, elles se rassemblent et forment de gros agrégats qui diffusent fortement et de la même manière toutes les radiations, comme les gouttelettes du brouillard et des nuages. L'expression « un nuage de lait » prend alors tout son sens.

Qu'est-ce que la réfraction atmosphérique ?

Comment courber les rayons lumineux ?

Quand la lumière passe d'un milieu transparent à un autre milieu d'indice de réfraction plus grand, elle change de direction en se rapprochant de la normale (voir le schéma page 215). Si elle traverse un empilement de lames transparentes dont les indices vont croissant, elle parcourt une ligne brisée dont la concavité est dirigée vers le bas (figure a ci-dessous). Si les indices vont en diminuant, la concavité est dirigée vers le haut (figure b).



Une suite de segments rectilignes parcourue par la lumière qui traverse un empilement de lames transparentes d'indices (a) croissants, (b) décroissants.

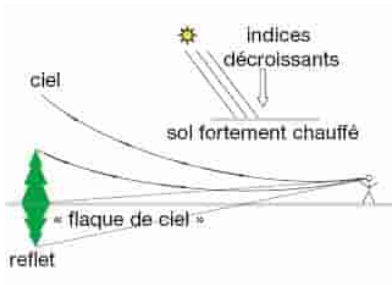
Dans les deux cas, la concavité est dirigée vers les indices les plus grands. Les rayons lumineux sont donc *courbés* quand ils traversent un milieu dans lequel l'indice varie de façon continue. C'est souvent le

cas dans l'atmosphère : l'indice de réfraction de l'air diminue avec sa *masse volumique* qui dépend de la température et de la pression. La variation d'indice qui en résulte courbe les rayons lumineux et produit souvent des phénomènes optiques remarquables.

Les mirages

Quand le sol est fortement chauffé par le soleil, la température de l'air à son contact est nettement plus élevée que celle de l'air ambiant. Les rayons lumineux qui descendent vers le sol rencontrent de l'air dont la température s'élève, donc dont la masse volumique et l'indice de réfraction diminuent. Ils sont courbés avec une concavité dirigée vers le haut, comme sur la figure b. La courbure crée des images dont la forme dépend de la façon dont la température varie au voisinage du sol.

Le cas classique du « mirage inférieur inversé » est schématisé sur la figure qui suit.



voit les objets plus hauts qu'ils ne le sont en réalité, ils semblent *suspendus en l'air*. L'un de ces mirages est le « Fata Morgana ». Il fait référence à la fée Morgane qui entraînait les hommes dans les châteaux qu'elle faisait apparaître. Ce mirage se produit quand la variation de température de l'air est très irrégulière. On voit des sortes de murailles crénelées flotter au-dessus de la mer.

La courbure des rayons lumineux dans l'air est fréquente, mais elle ne crée pas forcément un mirage. Dans la légende du tableau page 12, qui donne la distance à laquelle les bateaux disparaissent à cause de la rotondité de la Terre, il est précisé que la réfraction atmosphérique n'est pas prise en compte. En réalité, elle existe toujours plus ou moins. En été la mer est plus froide que l'air et les rayons lumineux sont courbés comme sur la figure a page 255. Les objets lointains sont « relevés », ce qui augmente la distance à laquelle on peut les voir.

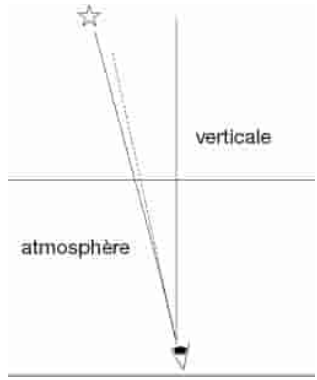
Mais aussi…

Les mirages vus par Saint-Exupéry dans *Terre des hommes*

« La chaleur monte et, avec elle, naissent les mirages […]. De grands lacs se forment et s'évanouissent quand nous avançons […]. À perte de vue, c'est le vide. Mais, à l'horizon, des jeux de lumière composent des mirages déjà plus troublants. Forteresses et minarets, masses géométriques à lignes verticales. J'observe aussi une grande tache noire qui simule la végétation, mais elle est surplombée par le dernier de ces nuages qui se sont dissous dans le jour et qui vont renaître ce soir. Ce n'est que l'ombre d'un cumulus. »

La réfraction astronomique

Dans la troposphère, la masse volumique de l'air diminue quand l'altitude augmente. Cette diminution se poursuit dans la stratosphère et dans toute l'atmosphère. Les rayons qui traversent l'atmosphère sont donc courbés comme sur la figure a page 255, et les astres vus de la Terre paraissent plus hauts dans le ciel qu'ils ne le sont en réalité.



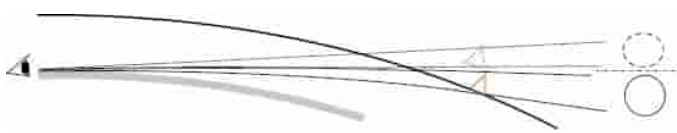
Effet de la réfraction atmosphérique sur la direction apparente d'un astre.

Les rayons lumineux provenant de l'astre sont courbés vers le bas en traversant l'atmosphère. L'angle entre les directions réelle (traits continus) et apparente (tirets) de l'astre est exagéré pour la clarté de la figure. Il est nul quand l'astre est au zénith.

Le relèvement est d'autant plus important que le trajet de la lumière est long. L'écart entre les directions réelle et apparente de l'astre s'accroît donc beaucoup quand il s'approche de l'horizon : il vaut une minute d'angle quand l'astre est à 45° et atteint 34 minutes près de l'horizon. Cette déviation complique les observations astronomiques, et les astronomes évitent de faire des mesures quand l'astre qu'ils étudient est trop bas sur l'horizon. Précisons aussi que ce sont les fluctuations de la masse volumique de l'air qui font *scintiller* les étoiles.

Voir le soleil sous l'horizon

La réfraction atmosphérique a des effets inattendus et parfois spectaculaires. L'un d'eux a lieu chaque jour au lever et au coucher du soleil. Le diamètre apparent du soleil étant de 32 minutes d'angle, le relèvement de 34 minutes permet de le voir quand il est *sous l'horizon* !



Représentation schématique des effets de la réfraction atmosphérique au lever et au coucher du soleil.

La ligne d'horizon est indiquée à droite en point tiret. Les rayons lumineux issus du soleil (traits continus) sont courbés en traversant l'atmosphère. L'observateur perçoit l'image en pointillé. Le triangle marron représente le pic du Canigou évoqué plus bas.

Son image est d'ailleurs déformée. En effet, les rayons issus du bord inférieur du soleil effectuent un trajet plus long dans l'atmosphère que ceux issus du bord supérieur, et ils sont davantage courbés. Le bord

inférieur est plus relevé que le bord supérieur, et l'astre paraît *aplati*. L'aplatissement est de 6 minutes environ, soit 20 %. Puisque le soleil nous éclaire encore quand il est sous l'horizon, la journée dure un peu plus longtemps ! L'allongement a lieu matin et soir, et il est de l'ordre de quelques minutes.

La « lune de sang »

Les éclipses de Lune ont lieu quand le Soleil, la Terre et la Lune sont alignés et que la Lune passe dans l'ombre de la Terre. Mais cette ombre n'est pas totale. En effet, les rayons qui rasent la Terre traversent son atmosphère et sont déviés vers la Lune par la réfraction atmosphérique. La traversée de l'atmosphère appauvrit considérablement la lumière en radiations de courte longueur d'onde, et la Lune est éclairée par une lumière *rouge*.

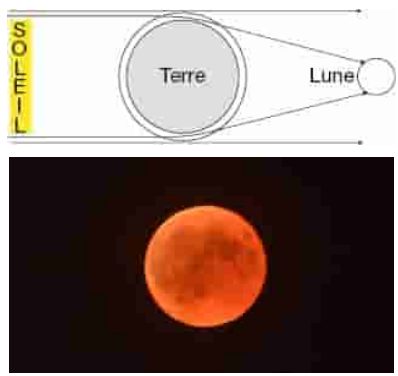


Photo Christian Dorel

Courbure des rayons lumineux par l'atmosphère lors d'une éclipse de Lune.

La distance Terre-Lune n'est pas du tout à l'échelle.
La photo a été prise lors de l'éclipse totale du 27 juillet 2018.

Le Canigou vu de Marseille

Si on trace sur une carte une ligne droite qui part de Marseille dans la direction ouest sud-ouest, elle traverse le golfe du Lion et arrive sur le massif du Canigou qui constitue l'extrémité orientale des Pyrénées. Son sommet, qui culmine à près de 2 800 m d'altitude, est un lieu d'excursions très fréquenté par les randonneurs catalans. Depuis les collines proches de Marseille, on peut observer début février et fin octobre l'ensemble du massif distant de 260 km au coucher du Soleil, alors que seuls les plus hauts sommets devraient être visibles à cause de la rotondité de la Terre.

Photo Robert Derrives

Le massif du Canigou vu à 260 km depuis Notre-Dame du Château (310 m) au-dessus d'Allauch.

La photo a été prise le 9 février 2008 vers 18 h. Le pic (2 784 m) est à droite.
Noter la couleur jaune orangé du soleil *aplati* et le ciel rouge.

À ces deux moments de l'année, le soleil se couche derrière le Canigou, et celui-ci arrête une partie des rayons du soleil (figure du haut de la page précédente). Les autres rayons arrivent courbés par la réfaction atmosphérique, et on voit le contour du Canigou en ombre chinoise.

Certains matins d'hiver, au lever du soleil, les Niçois peuvent voir les montagnes corses distantes de 200 km environ. À 200 mètres d'altitude, la rotondité de la Terre devrait empêcher de voir tout ce qui est plus bas que 2 000 m. Or la plupart des sommets visibles sur la photo sont nettement plus bas. D'autres photos prises en plein jour montrent les montagnes enneigées : la montagne éclairée par le soleil émet de la lumière, et celle-ci, courbée par la réfraction atmosphérique, arrive aux yeux des observateurs.

Photo Bernard Cinquin

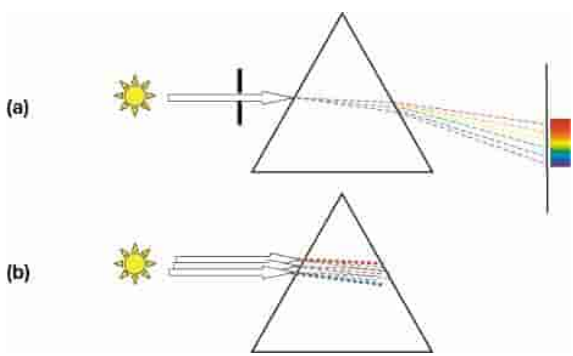
Les montagnes corses vues de Nice au lever du soleil, à 200 m d'altitude.

De la couleur par dispersion de la lumière ?

Quand la lumière passe d'un milieu transparent à un autre, ses radiations sont réfractées dans des directions déterminées par les indices de réfraction des deux milieux (voir complément page 225). Ces indices dépendent de la longueur d'onde, et les radiations de longueurs d'onde différentes ne sont pas déviées de la même manière : c'est le phénomène de *dispersion* de la lumière.

Le prisme magique

L'indice de réfraction de l'air augmente quand la longueur d'onde des radiations diminue, mais beaucoup moins que celui du verre. Au passage de l'air dans le verre, les radiations « violettes » et « bleues » sont davantage déviées que les rouges, comme le montre la fameuse expérience du prisme (figure a page suivante). Au XVII^{e} siècle, Newton a interprété correctement cette expérience en montrant que la superposition des radiations dispersées redonnait du blanc sur un écran. C'est pour cette raison que le faisceau incident doit être le plus fin possible (figure b).

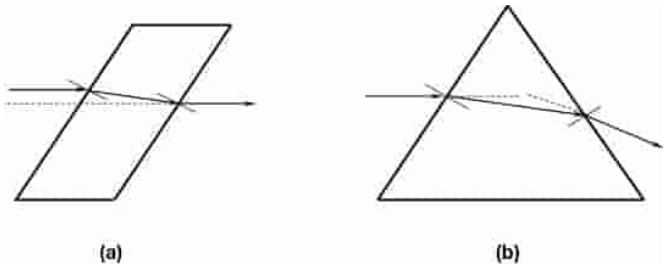


Dispersion de la lumière du soleil par un prisme de verre.

(a) Le trajet des radiations *invisibles* de la lumière est représenté en pointillé. Les « violettes » sont plus réfractées que les « rouges ».
(b) Si le faisceau incident est trop large, ses radiations se superposent et redonnent du blanc. Seules les couleurs extrêmes, rouge et violet, sont alors visibles sur les bords.

Pourquoi un prisme est-il nécessaire ? Pour que les radiations soient dispersées en traversant un corps, il faut qu'elles soient *déviées*. Quand un rayon rencontre une lame de verre à faces parallèles, la déviation due à la première réfraction est suivie d'une déviation en sens inverse, et le rayon sort dans la direction qu'il avait à l'entrée :

globalement, il n'y a pas de déviation et donc pas de dispersion (figure a ci-dessous). La lumière blanche reste blanche et les objets gardent leurs couleurs : c'est bien ce qu'on exige de la vitre d'une fenêtre ! Dans le cas du prisme, les effets des deux réfractions successives *s'ajoutent*, et la dispersion a lieu (figure b).

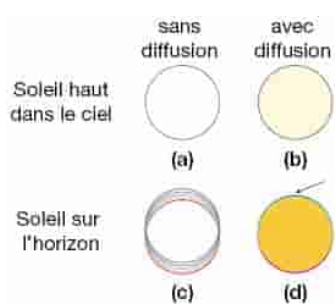


Traversée de deux corps transparents par un rayon lumineux.

(a) Lame à faces parallèles ; (b) prisme. Les traits courts sont les normales aux surfaces.

Le rayon vert

Puisque la courbure des rayons lumineux par l'atmosphère est due à la réfraction, elle est un peu plus grande pour les radiations « violettes » que pour les « rouges ». La différence est maximale quand le soleil est sur l'horizon : les rayons « violets » et « rouges » arrivent alors à nos yeux dans des directions qui diffèrent de 40 secondes d'angle environ. Cette différence est inférieure au pouvoir séparateur d'un œil normal qui est de 1 minute d'angle. Les radiations de longueurs d'onde différentes se superposent dans nos yeux, et nous percevons une lumière *blanche*, ou plutôt jaune orangé à cause de la diffusion moléculaire. Mais la superposition n'est pas totale à cause de l'effet de bord représenté sur la figure b du haut de la page précédente. On le voit sur le schéma ci-dessous, où le soleil est représenté de face. Sa surface nous envoie toutes les radiations du spectre visible et nous voyons la superposition des disques colorés dus à ces radiations.



© Getty Images

Origine du rayon vert.

Le soleil est représenté haut dans le ciel (a et b), puis bas sur l'horizon (c et d), avec et sans diffusion moléculaire. L'aplatissement du soleil n'est pas représenté.

• Quand le soleil est haut dans le ciel, l'effet de la réfraction atmosphérique est négligeable, et tous les disques se superposent (figure a). Une petite partie des radiations violettes et bleues est prélevée par la diffusion moléculaire et nous voyons le soleil légèrement jaune (figure b).

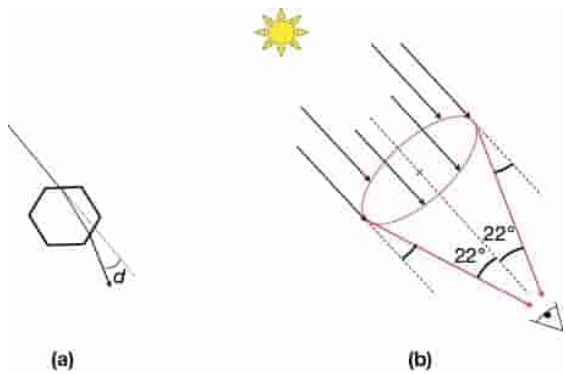
• Quand le soleil est sur l'horizon, tous les disques colorés sont relevés, les violets un peu plus que les rouges, avec une différence de 40 secondes. Les radiations se superposent presque partout pour donner du blanc, s*auf sur les bords* où subsistent des liserés : rouge au bord inférieur, violet au bord supérieur (figure c). La diffusion moléculaire, très importante dans cette situation, prélève pratiquement toutes les radiations *violettes* et *bleues*. La zone centrale est orangée et le liséré supérieur *vert* (figure d). On peut parfois observer ce liseré vert au coucher du soleil quand la partie orangée disparaît sous l'horizon. L'atmosphère doit être stable pour qu'il n'y ait pas de fluctuation d'indice de réfraction, et les nuages ne doivent pas faire écran. Le phénomène est bref, quelques secondes seulement, car le soleil descend rapidement. La description qu'en fait Jules Verne est très fidèle et le terme anglais, « *green flash* », lui convient bien.

Le halo

Les cirrus, des nuages de haute altitude, sont constitués d'une multitude de microcristaux de glace. Ce sont des prismes de section hexagonale dont la dimension varie de quelques microns à quelques centaines de microns. Leurs faces réfléchissent une partie de la lumière du soleil, ce qui rend ces nuages brillants. La lumière qui pénètre dans les cristaux subit des réflexions et des réfractions, et sort en produisant parfois des phénomènes remarquables.

Le plus fréquent, et le plus spectaculaire, est dû aux rayons qui

subissent deux réfractions successives. Le cristal se comporte alors comme un prisme (comparer la figure a page suivante à la figure b en bas de la page 262), et l'angle de déviation *d* est le plus petit pour les radiations « rouges ». Pour ces radiations, il varie entre 22 et 43 degrés quand le prisme prend toutes les orientations possibles par rapport à la direction du soleil. Si les cristaux sont orientés aléatoirement dans le nuage, les rayons déviés *se concentrent* dans la direction qui correspond à la déviation *la plus petite* $d_{\text{min}} = 22$ degrés. L'observateur au sol voit donc un anneau rouge centré dans la direction du soleil, sous l'angle $2d_{\text{min}} = 44$ degrés (figure b).



Le halo de 22 degrés.

(a) Un rayon lumineux traverse un cristal de glace de section hexagonale et subit deux réfractions successives. Il est dévié d'un angle *d*.
(b) Les rayons du soleil qui rencontrent un nuage sont déviés par ses microcristaux de glace. Quand ceux-ci sont orientés aléatoirement, les « rayons rouges » se concentrent dans la direction qui fait un angle de 22° avec la direction du soleil. L'observateur au sol voit un anneau rouge sous un angle de 44°.

Si on tend un bras pour masquer le soleil avec la paume de sa main, l'anneau passe à peu près par l'extrémité des doigts. Bien entendu, l'anneau n'est complet que si le nuage couvre une surface assez grande. Les autres radiations se superposent aux radiations rouges dont la déviation est plus grande que d_{min}, ce qui produit un anneau extérieur blanc.

Photo Jean-Pierre Blache

Un halo de 22 degrés produit *au sol*.

Un poudrin de microcristaux de glace soufflés par le vent passe devant le soleil bas sur l'horizon. Noter le contraste entre l'intérieur sombre de l'anneau et l'extérieur blanc brillant.

L'arc-en-ciel

Alors que les gouttelettes du brouillard et des nuages *diffusent* la lumière, les gouttes de pluie, de dimension millimétrique, sont assez grosses pour la réfracter et produire un arc-en-ciel.

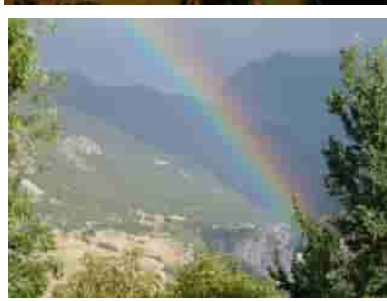


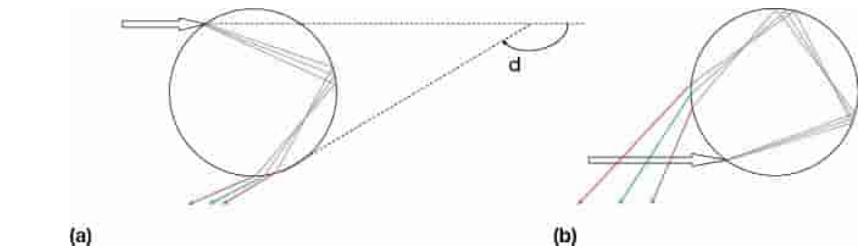
Photo Christian Dorel

Arcs-en-ciel.

On devine le deuxième arc sur la photo de gauche et l'arc violet sur celle de droite.

Tout le monde sait qu'il faut avoir la pluie devant soi et le soleil

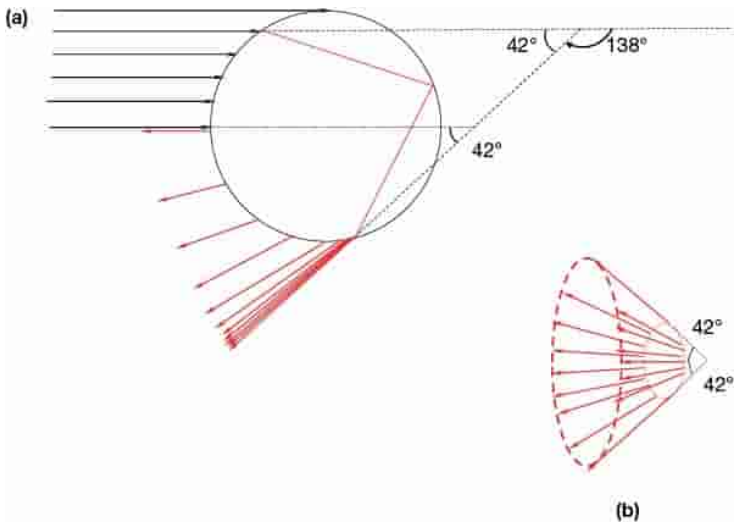
dans le dos pour avoir une chance de voir un arc-en-ciel. L'explication habituelle est la suivante : lorsqu'un rayon lumineux pénètre dans une goutte d'eau, il subit une réfraction, une réflexion, et une deuxième réfraction qui le renvoie vers le soleil. La déviation n'est pas la même pour les différentes radiations, et celles-ci sortent dispersées (figure a ci-dessous). Comme dans le cas du halo, c'est pour les radiations « rouges » que la déviation, l'angle *d* de la figure, est la plus petite. Mais cette figure n'illustre qu'un aspect du phénomène. Elle est d'ailleurs trompeuse, car elle suggère que le rouge est plus bas que le violet dans l'arc-en-ciel principal, alors que c'est l'inverse qui est vrai.



Dispersion de la lumière blanche par une goutte d'eau.

(a) Trajet des radiations qui génèrent l'arc principal.
(b) Trajet des radiations qui génèrent le deuxième arc.

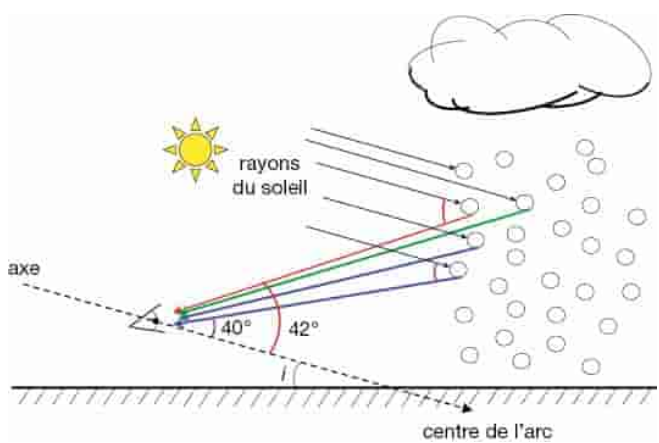
Dans le cas du halo, la déviation des rayons lumineux dépend de l'orientation des prismes de glace par rapport à la direction du soleil. Les gouttes d'eau étant sphériques, leur orientation par rapport au soleil n'intervient pas. Mais quand un faisceau de lumière éclaire une goutte, tous les rayons ne rencontrent pas sa surface sous le même angle d'incidence, ils ne sont pas réfractés de la même manière et leurs déviations sont différentes. La figure ci-dessous le montre pour les radiations « rouges ». Pour ces radiations, la déviation *d* varie entre 138 et 180 degrés. Comme dans le cas du halo, les rayons sortants se concentrent dans la direction qui correspond à la déviation *la plus petite*, qui est ici $d_{\min} = 138^\circ$: leur intensité se concentre dans un faisceau conique de demi-angle 42° dirigé vers le soleil (figure b), qui évoque un volant de badminton dont les plumes seraient remplacées par des rayons colorés.



Faisceau de radiations « rouges » renvoyées par une goutte d'eau éclairée par le soleil.

a) La goutte est vue en coupe. Le trajet représenté est celui de la radiation rouge qui subit la déviation la plus petite (d_{min} = 138°). Les rayons sortants se concentrent dans cette direction.
b) En faisant tourner la figure (a) de 360° autour du diamètre en pointillé, on obtient le faisceau conique renvoyé par la goutte.

Les autres radiations donnent des faisceaux coniques avec des angles plus petits. Cet angle est égal à 40 degrés environ pour les radiations « violettes ». Chaque goutte d'eau éclairée renvoie donc vers le soleil un jeu de faisceaux colorés, emboîtés les uns dans les autres. Quand un rideau de pluie est éclairé par le soleil, toutes ses gouttes renvoient ces faisceaux multicolores, mais la « couleur des radiations » qui arrivent à nos yeux dépend de la direction des gouttes. Par exemple, nous recevons les radiations « rouges » des gouttes dont la direction fait un angle de 42 degrés avec l'axe parallèle aux rayons du soleil qui passe par notre œil.



Direction des radiations perçues par l'observateur d'un arc-en-ciel.

L'*axe* est la direction du soleil passant par l'œil de l'observateur. La figure est dans le plan vertical qui contient cet axe. Chaque goutte renvoie ses faisceaux colorés, mais seuls sont représentés les rayons qui arrivent à l'œil de l'observateur. On obtient l'arc complet en faisant tourner la figure autour de l'axe.

L'ensemble de ces gouttes forme un anneau de demi-angle 42 degrés, centré sur cet axe. C'est la même chose pour les autres radiations avec des angles plus petits, et c'est l'ensemble de ces anneaux colorés qui constitue l'arc-en-ciel. Leur intensité est d'autant plus grande que le débit des gouttes est important.

Quand nous nous déplaçons, nous emportons *notre axe* et donc *notre arc-en-ciel*, de la même manière que nous emportons notre reflet quand nous nous déplaçons devant un miroir. L'amplitude de l'arc dépend du moment de la journée. Au lever et au coucher du soleil, l'angle i est nul, et on peut voir un demi-cercle complet si le soleil n'est pas masqué par le relief. Quand le soleil monte dans le ciel, l'angle i augmente et l'amplitude de l'arc diminue. Il disparaît quand les rayons rouges sont horizontaux, c'est-à-dire quand i atteint 42°. Vers le solstice d'été, le soleil est trop haut pendant une bonne partie de la journée pour qu'on puisse observer un arc-en-ciel.

La *dimension* des gouttes n'intervient pas dans cette description. Par contre, leur *forme* est très importante : si les gouttes n'étaient pas sphériques, la déviation d (schéma a page 267) dépendrait de leur orientation par rapport au soleil, les rayons lumineux ne se concentreraient pas dans une direction particulière, et il n'y aurait pas d'arc-en-ciel. Chaque fois que le soleil éclaire un nombre assez grand de gouttes d'eau, un fragment d'arc-en-ciel apparaît.

Arc créé par une cascade.

Les rayons lumineux qui subissent *deux réflexions* à l'intérieur d'une goutte (schéma b page 267) créent un second arc qui est parfois visible au-dessus du premier. Il diffère de l'arc à 42° sur plusieurs points :

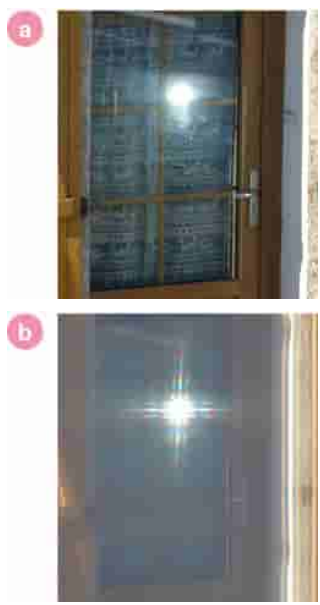
- L'ordre des couleurs est inversé, et celles-ci sont plus étalées : les

angles indiqués sur la figure de la page qui précède deviennent 50° 30’ pour le rouge et 54° pour le violet.

• Chaque réflexion interne donnant lieu à une perte de lumière, l’intensité est plus faible.

La couleur par diffraction : la couronne

Nous avons vu que les *interférences* dues à la nature ondulatoire de la lumière produisaient parfois des couleurs « structurelles » sur les animaux. Un autre phénomène typique des ondes, la *diffraction*, a lieu quand la lumière rencontre un obstacle dont la dimension n’est pas grande par rapport à sa longueur d’onde. La figure de diffraction dépend de la forme de l’obstacle mais aussi de la longueur d’onde, ce qui crée de la couleur. On le voit bien quand on observe une lampe à travers le voile de tulle d’une fenêtre.



Séparation des radiations de la lumière blanche par diffraction.

Avant (a) et après (b) interposition d’un voile de tulle.

Les *altostratus* sont des nuages d’altitude moyenne, dont les nappes grisâtres possèdent des zones assez minces pour laisser voir le disque du soleil. La nuit, leurs gouttelettes d’eau diffractent la lumière de la lune et produisent parfois une *couronne* qui rappelle le halo, mais l’ordre des couleurs est inversé : le rouge est à l’extérieur et le blanc, plus rarement le bleu, à l’intérieur. Le rayon de la couronne est d’autant plus grand que les gouttelettes sont petites.

Couronne incomplète autour de la pleine lune.

Compléments

www.lienmini.fr/39798-cpltsP270

Le bleu du ciel et la diffusion moléculaire
Épaisseur d'air traversée par la lumière du soleil sur l'horizon
Les divers phénomènes dus à l'interaction de la lumière avec les petites particules

5

La vie sur Terre

À la recherche des origines de la vie

> *S'il paraît clair que microbes, champignons, plantes, animaux, humains, bref nous autres vivants, nous descendons tous de quelque protobactérie initiale, nous ne sommes pas près de connaître dans le détail le véritable visage que présentait notre ancêtre commun.*
>
> *François Jacob, Université de tous les savoirs, 2000*

Depuis une vingtaine d'années, nous avons beaucoup appris sur les conditions dans lesquelles les êtres vivants sont apparus sur Terre. Nous savons que la vie microbienne existait déjà il y a 3,5 milliards d'années, nous avons découvert que les « molécules de la vie » ont pu se former avant la vie, et nous commençons à comprendre comment elles se sont organisées en cellules capables de se répliquer et de maintenir leur intégrité. Ces différents aspects sont abordés dans ce chapitre.

Quel est l'âge des atomes de notre corps ?

Les personnes âgées s'entendent dire parfois qu'elles ont l'âge de leurs artères. C'est bien possible, mais quel est l'âge des molécules qui constituent ces artères ? Ces molécules sont le résultat d'une série de réactions chimiques au cours desquelles des liaisons entre atomes ont été rompues et d'autres se sont formées. Mais les atomes eux-mêmes n'ont pas changé, et on pourrait penser qu'ils sont éternels et qu'ils ont toujours existé. En réalité, ils sont tous très âgés, mais ils ont une date de naissance.

Dans notre corps, les éléments les plus abondants sont l'hydrogène (61 %), l'oxygène (24,1 %), le carbone (12,6 %) et l'azote (1,4 %). Viennent ensuite le phosphore, le calcium, le magnésium, le potassium, le soufre, le sodium et le chlore, et de nombreux éléments comme le fer qui, même à l'état de trace, ont un rôle très important. Tous ces éléments viennent de la Terre, et celle-ci s'est formée à partir

des poussières et des gaz du nuage moléculaire qui est à l'origine du Système solaire. Mais d'où venaient les atomes qui constituaient ces poussières et ces gaz ?

La genèse des éléments chimiques

Les atomes sont constitués de trois sortes de particules élémentaires : les neutrons sans charge, les protons chargés positivement, et les électrons chargés négativement qui sont beaucoup plus légers que les deux autres. Les protons et les neutrons sont rassemblés dans le *noyau*, qui porte donc une charge positive, et ce noyau est entouré d'un « nuage » d'électrons négatifs. Il y a autant d'électrons que de protons dans les atomes qui sont donc électriquement neutres. Le *nombre de protons* d'un atome est son *numéro atomique Z*. Il varie de 1 à 92 dans les atomes que l'on trouve dans la nature, les *éléments chimiques*. L'élément $Z = 1$, qui contient un proton et un électron, est l'hydrogène H. L'élément $Z = 2$ est l'hélium He, etc. L'élément le plus lourd est l'uranium U, qui contient 92 protons et électrons.

La formation des noyaux, la *nucléosynthèse*, a démarré très tôt : ceux des éléments les plus légers, hydrogène et hélium, ont été produits au cours des premières minutes qui ont suivi le Big Bang. Ils constituent 98 % de la masse totale de la matière « visible » de l'Univers. Les autres noyaux se sont formés et continuent à se former dans les étoiles, où les réactions nucléaires de *fusion* produisent des noyaux d'autant plus lourds que la température est plus élevée. Ceux du lithium (Li, $Z = 3$), du béryllium (Be, $Z = 4$) et du bore (B, $Z = 5$) ont servi d'intermédiaires, mais ils ne se sont pas accumulés dans les étoiles. On pense qu'ils se forment dans le milieu interstellaire, quand des atomes de carbone (C, $Z = 6$), d'azote (N, $Z = 7$) et d'oxygène (O, $Z = 8$) sont brisés par les particules de haute énergie des rayons cosmiques. Les autres éléments, jusqu'au fer de numéro atomique 26, sont produits au cœur des étoiles les plus massives. Mais la vie des très grosses étoiles est brève, à peine quelques millions d'années, et elle se termine en feu d'artifice par l'explosion gigantesque d'une *supernova* ! Les noyaux et les particules élémentaires de l'étoile sont éjectés dans le milieu interstellaire, et des réactions qui ne pouvaient pas avoir lieu dans l'étoile produisent les noyaux des éléments les plus lourds jusqu'à l'uranium. C'est aussi dans le milieu interstellaire que les noyaux capturent des électrons et forment des atomes.

Cristal hexagonal de béryl dans une pegmatite.

C'est du béryl que l'on extrait le béryllium, un élément stratégique aux nombreuses applications. Mais les béryls de qualité gemme s'appellent… des émeraudes.

Finalement, que peut-on dire de l'âge des atomes de notre corps ? Les noyaux des atomes d'hydrogène sont des vieillards âgés d'environ 13 milliards d'années, mais ils sont très bien conservés. Ceux des autres éléments sont nés dans des étoiles ou à la faveur d'explosion de grosses étoiles. Leur âge est compris entre celui de notre galaxie, environ 12 milliards d'années, et celui du Système solaire, 4,6 milliards d'années.

Photo Jérôme Astréoud

Une partie des dentelles du Cygne, un rémanent d'une supernova qui a explosé il y a une dizaine de milliers d'années.

Nous sommes tous des poussières d'étoiles

C'est à la fin des années 1950 que l'on a compris le rôle essentiel des étoiles dans la nucléosynthèse. L'expression « nous sommes faits

de poussières d'étoiles (*star stuff*) » a été introduite en 1973 par l'astronome américain Carl Sagan, à l'occasion d'une émission de vulgarisation scientifique. Elle a été reprise en 1984 par Hubert Reeves qui l'a popularisée avec talent auprès du public francophone. Mais la Canadienne Joni Mitchell les avait précédés, qui chantait en 1970 :

> « Nous sommes de la poussière d'étoiles (*star dust*)
> Nous sommes de l'or
> Et il nous faut retourner
> Au jardin d'Eden. »

On peut remonter plus loin. Dans le beau roman *Martin Eden* de Jack London, on trouve la phrase suivante :

> « Il savait parfaitement que les fibres de la beauté et de la vie sont intimement mêlées et que lui-même n'était qu'une parcelle de cet insondable, tissé de soleil, de poussière d'étoiles et d'éther. »

Une intuition poétique qui date de 1908 !

Photo Jérôme Astréoud

La Voie lactée.

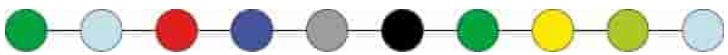
Qu'appelle-t-on « les molécules de base de la vie » ?

On peut définir un *être vivant* comme une entité capable d'assimiler des nutriments et d'en extraire de l'énergie, pour maintenir son intégrité et se reproduire. Cette définition caractérise la *vie cellulaire*

dont les représentants les plus simples sont actuellement les *bactéries*. Les virus sont exclus, car ils ne sont pas autonomes : pour se reproduire, ils doivent pénétrer dans une cellule vivante et utiliser ses enzymes. Deux familles de molécules permettent aux êtres vivants d'accomplir leurs fonctions : les *protéines* et les *acides nucléiques*, que l'on qualifie de « molécules de base de la vie ». Elles sont brièvement décrites dans ce qui suit.

Les protéines

Une protéine est une chaîne d'*acides aminés*. Les acides aminés sont de grosses molécules dont la masse molaire est de l'ordre de 100 g mol^{-1}.



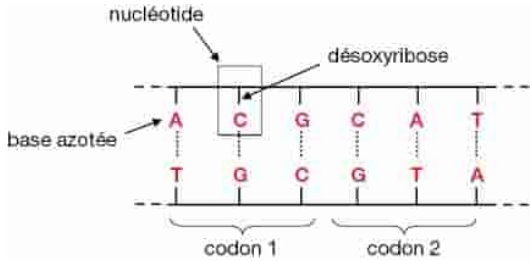
Chaîne d'acides aminés.

Une protéine est une chaîne dont les maillons sont des acides aminés, représentés ici par des disques colorés.

Bien qu'il en existe un très grand nombre, seuls 20 acides aminés sont utilisés par les êtres vivants. Les protéines diffèrent entre elles par la longueur de la chaîne, la nature des acides aminés et leur séquence, c'est-à-dire l'ordre dans lequel ceux-ci sont rangés. Les plus petites comportent environ 60 acides aminés, les plus grosses plusieurs milliers. Sous l'effet des interactions entre acides aminés, et entre acides aminés et eau, la chaîne se replie et adopte la structure adaptée à sa fonction dans la cellule. Ces fonctions sont très variées. Chez les animaux vertébrés par exemple, l'hémoglobine transporte les molécules O_2 et CO_2 dans le sang, et la myosine joue un rôle essentiel dans la contraction des muscles. Les anticorps de notre système immunitaire, les immunoglobulines, sont des protéines, ainsi que les récepteurs hormonaux. Mais la fonction universelle des protéines dans les êtres vivants est de *catalyser* de façon spécifique chacune des nombreuses réactions chimiques qui ont lieu dans les cellules. Ces protéines particulières sont les *enzymes*.

Les acides nucléiques

***L'ADN, acide** désoxyribonucléique*

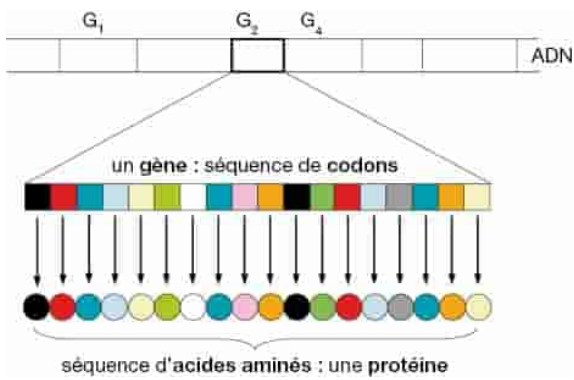


Représentation schématique d'un segment d'ADN.

Les liaisons hydrogène entre bases complémentaires sont en pointillé.

Cette très longue macromolécule est une double chaîne (ou double *brin*) de *nucléotides*. Il existe 4 nucléotides qui diffèrent par leurs *bases azotées* : adénine A, thymine T, guanine G et cytosine C, et chaque base est liée à la chaîne par un groupe *désoxyribose*. Les deux brins sont raccordés par les liaisons hydrogène de type NH---O et NH---N entre les bases *complémentaires* : G et C d'une part, A et T d'autre part.

Des torsions se produisent spontanément dans l'eau, et la molécule d'ADN s'enroule en formant une double hélice. Certains segments d'ADN sont des *gènes* qui permettent de construire les protéines. La séquence de leurs bases est en effet organisée en triplets nommés *codons*, et à chaque codon correspond un acide aminé.



À la séquence des codons d'un gène correspond celle des acides aminés d'une protéine.

La correspondance entre codons et acides aminés est ici symbolisée par la couleur.

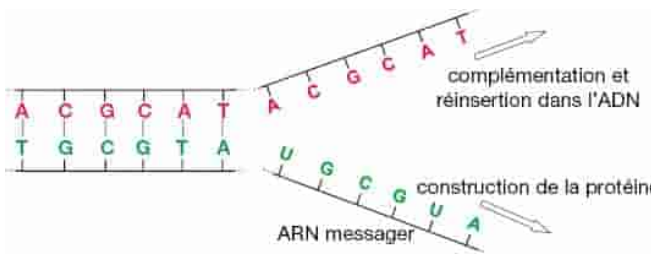
Le codon TGC (figure de la page précédente) correspond à l'acide aminé *cystéine*, et le codon GTA à l'acide aminé *valine*. Avec quatre bases, on peut définir 64 triplets différents, plus que le nombre d'acides aminés à coder. Plusieurs codons correspondent au même acide aminé et des « codons stop » servent à délimiter les gènes dans l'ADN. La correspondance entre codons et acides aminés, le « code génétique », *est la même pour tous les êtres vivants* : si on insère dans

l'ADN d'une bactérie le gène qui code pour une protéine humaine, par exemple l'insuline, la bactérie interprète ce gène exactement comme le font nos cellules, et elle fabrique de l'insuline. Actuellement, ce sont des bactéries qui synthétisent l'insuline avec laquelle on soigne les personnes diabétiques. C'est le caractère universel du code génétique qui est à la base du développement actuel des biotechnologies.

L'ensemble des gènes de l'ADN d'un être vivant constitue son *génome*. L'ADN a pour fonction de conserver le génome et de le transmettre aux descendants. La connaissance du génome d'un être vivant permet de savoir quelles protéines il utilise et donc de comprendre son mode de vie, et la comparaison des génomes d'espèces différentes permet d'établir des liens d'apparentement et de construire des arbres phylogénétiques.

***Les ARN, acides** ribonucléiques*

Pour construire une protéine, le gène qui code pour elle est identifié dans l'ADN. Afin d'éviter les altérations, ce gène est copié, et c'est la copie, l'*ARN messager*, qui est utilisée. La molécule d'ADN s'ouvre comme une fermeture éclair sous l'action d'une enzyme, et les deux brins se séparent. Un brin reçoit son brin complémentaire avant d'être réinséré dans l'ADN. L'autre brin, dit *codant*, est transformé en ARN messager : la thymine T est remplacée par l'uracile U, et le groupe désoxyribose devient un groupe ribose.



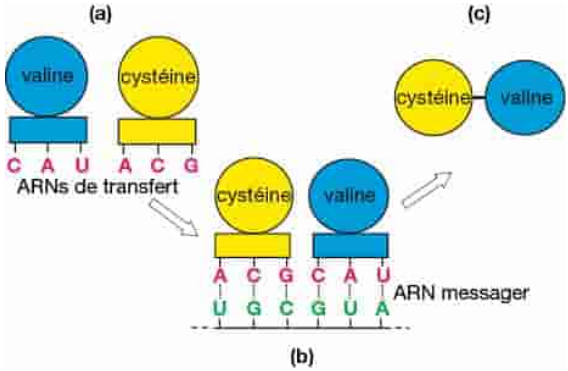
Transcription du segment de gène représenté en bas de la page 278.

Les bases du brin codant sont en vert.

Cette étape, la *transcription*, a lieu dans le cytoplasme chez les procaryotes et dans le noyau chez les eucaryotes.

Les protéines sont assemblées à partir d'« éléments préfabriqués », les *ARN de transfert*, constitués d'un acide aminé et du triplet de nucléotides *complémentaire* de celui qui code pour cet acide aminé. Sur la figure ci-après, le triplet CAU est complémentaire de GUA qui code pour la valine, et le triplet ACG est complémentaire de UGC qui code pour la cystéine. Grâce à la complémentarité, chaque ARN de transfert se lie de façon spécifique au triplet de bases de l'ARN messager qui code pour son acide aminé, ce qui garantit que la séquence des acides

aminés est conforme à celle des codons du gène.



Principe de la traduction du segment d'ARN messager de la figure de la page précédente.

a) Structure schématique des ARN de transfert.
b) Positionnement des ARN de transfert sur l'ARN messager et formation de la liaison entre les acides aminés.
c) Libération de la chaîne d'acides aminés.

Cette seconde étape, la *traduction*, a lieu au niveau des *ribosomes*, des organites situés dans le cytoplasme des cellules. Tous les êtres vivants actuels construisent leurs protéines de cette façon, avec quelques variations dans les détails. Comme la transcription, la traduction nécessite l'intervention de plusieurs enzymes. La synthèse des protéines fait donc appel à des enzymes qui sont elles-mêmes des protéines.

À quand remontent les plus anciennes traces de vie sur Terre ?

Les fossiles sont les restes ou les traces d'êtres vivants qui ont vécu dans le passé. Bien souvent, leurs parties molles ont disparu et seules subsistent les parties dures. La bonne conservation des fossiles nécessite la conjonction de conditions favorables dont la probabilité décroît rapidement quand on remonte dans le temps. L'histoire de la vie que racontent les fossiles visibles à l'œil nu est donc très incomplète. Mais le champ d'investigation des paléontologues s'est considérablement élargi depuis que des techniques d'observation des microfossiles et d'analyse des substances chimiques aux échelles micrométriques et nanométriques ont été développées. On a aussi compris que les *stromatolithes* pouvaient apporter des informations précieuses sur les populations bactériennes du passé. Ces concrétions, qui couvrent parfois de grandes étendues de rivages marins, sont des empilements de couches de carbonates qui ont précipité au contact de tapis de bactéries vivant en eaux peu profondes.

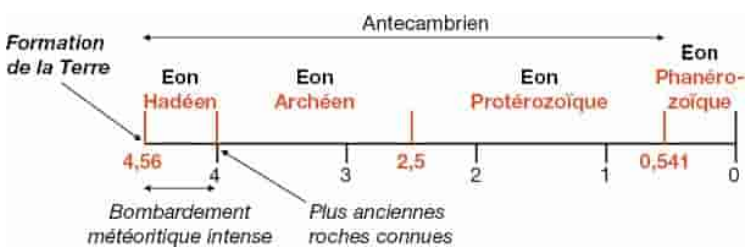
© Getty Images

Stromatolithes sur les rivages du lac salé Thétis, en Australie.

Les stromatolithes actuels sont produits par des communautés bactériennes dominées par des cyanobactéries, mais ce n'est pas nécessairement le cas de ceux qui sont fossilisés dans les roches très anciennes.

Les échelles de temps

La Terre s'est formée il y a 4,56 milliards d'années (Ga, voir l'Appendice page 334). Les géologues ont jalonné son histoire de repères qui correspondent souvent à des variations brutales de populations d'êtres vivants, telles les extinctions de masse. Les périodes les plus longues sont quatre *éons*, auxquels on a attribué des noms d'origine grecque : l'éon *Phanérozoïque*, qui a débuté au Cambrien il y a 541 millions d'années et se poursuit actuellement, est caractérisé par la présence d'êtres vivants visibles à l'œil nu.



Les éons, plus longues périodes géologiques de l'histoire de la Terre.

Les âges sont en milliards d'années (Ga).

Il était autrefois divisé en ères Primaire, Secondaire, Tertiaire et Quaternaire. On utilise actuellement la terminologie Paléozoïque et

Mésozoïque, et les deux dernières sont rassemblées dans le Cénozoïque. L'éon *Protérozoïque* évoque les débuts de la vie, et l'*Archéen* des temps très anciens. Quant à l'*Hadéen* qui a débuté avec la formation de la Terre, c'est littéralement une période *infernale* !

La Terre primitive

Nous ne connaissons pas de vestiges rocheux de l'éon Hadéen. Durant cette période, la contraction de la matière due aux forces de gravité, le bombardement des météorites et la radioactivité de certains éléments contribuaient à maintenir une température très élevée. Sous l'effet de la gravité, les minéraux en fusion se sont progressivement répartis en couches concentriques en fonction de leur densité, un peu comme l'huile et le vinaigre : au centre un noyau de fer et de nickel, puis les minéraux denses du manteau, et au-dessus les minéraux plus légers. Les gaz inclus dans les roches ont diffusé vers la surface, formant une enveloppe autour de la planète. Cette atmosphère primitive comportait surtout du dioxyde de carbone CO_2, de l'azote N_2, et de la vapeur d'eau H_2O. Lorsque le refroidissement a été suffisant, une croûte solide s'est formée et la condensation de la vapeur d'eau a produit des océans. C'est au sein de ces océans, à l'abri des météorites et du rayonnement ultraviolet, que les premières formes de vie ont pu apparaître.

La quête des fossiles les plus anciens

On trouve les roches terrestres les plus anciennes dans les « boucliers » archéens situés au cœur de certains continents. Le record actuel est détenu par les gneiss d'Acasta, au Canada (4,02 Ga). En France continentale, les roches les plus anciennes sont des gneiss âgés de 2 Ga. Ils forment des enclaves dans les célèbres granites roses des rivages des Côtes-d'Armor qui ne sont âgés que de 300 millions d'années.

Photo Anne Bertrand

Les granites roses des Côtes-d'Armor.

Les boucliers sont surtout constitués de roches magmatiques et métamorphiques, mais on y trouve parfois des stromatolithes et des *cherts*, des roches siliceuses peu transformées susceptibles de contenir des fossiles ou des traces d'activité chimique caractéristiques de la vie. On annonce régulièrement la découverte de tels restes dans des roches archéennes du Groenland, du nord-est du Canada, d'Afrique du Sud et d'Australie, mais leur âge et leur origine biologique sont souvent contestés, parfois même remis en cause par des études ultérieures. La présence de traces de vie microbienne passée est attestée en Australie, dans les *cherts* de la formation Dresser (3,48 Ga) et dans les stromatolithes de la formation Strelley Pool (3,43 à 3,35 Ga), et en Afrique du Sud dans les stromatolithes de la formation de Barberton (3,5 à 3,25 Ga). On a trouvé de la matière organique fossile dans des roches du Groenland plus anciennes (3,8 Ga), mais son origine biologique n'est pas totalement établie.

Une vie microbienne existait donc sur Terre il a 3,5 milliards d'années. Si on admet que la vie était impossible pendant l'Hadéen, elle serait apparue moins de 500 millions d'années après que les conditions furent devenues favorables.

Des pistes pour comprendre l'origine de la vie sur Terre ?

En remontant aux origines, on tombe inévitablement sur le problème de l'œuf et de la poule, qui se présente ici dans les termes suivants :

1. Les molécules de la vie, protéines et acides nucléiques, sont actuellement synthétisées par les êtres vivants. Comment ont-elles pu se former avant l'apparition de la vie ?

2. La synthèse des protéines nécessite des enzymes spécifiques, et

ces enzymes sont elles-mêmes des protéines. Comment l'histoire a-t-elle pu démarrer ?

Ces questions ont reçu des réponses depuis plusieurs dizaines d'années, et des pistes sérieuses ont été proposées pour comprendre comment la vie a pu débuter sur notre planète.

Les molécules de la vie ont existé avant la vie

En 1953, Stanley Miller et Harold Urey ont réalisé une expérience qui est restée célèbre. Ces chimistes américains ont montré que si on soumettait le mélange gazeux (eau H_2O, dihydrogène H_2, méthane CH_4 et ammoniac NH_3) à des décharges électriques pendant une semaine, on obtenait de nombreux composés organiques, parmi lesquels des bases azotées et des acides aminés. C'était la première fois que ces molécules étaient synthétisées par voie *abiotique*, c'est-à-dire en absence d'êtres vivants. Cette expérience avait pour but de montrer que l'action de la foudre sur l'atmosphère primitive de la Terre avait pu produire ces molécules complexes. Nous savons aujourd'hui que la concentration de H_2 était très faible au début de l'histoire de la Terre et que la principale source de carbone n'était pas CH_4, mais CO_2. Dans ces conditions beaucoup moins « réductrices », la même expérience ne produit pas de composés organiques. Des essais ont été faits sur des mélanges dont la composition était plus proche de celle de l'atmosphère de la Terre primitive. En 2017, une équipe franco-tchèque a soumis le mélange gazeux (H_2O, CO, NH_3) à des ondes de choc mimant des impacts de météorites. Ils ont obtenu un acide aminé, la glycine, et les quatre bases azotées des acides nucléiques. Les molécules de la vie ont donc pu être produites sur Terre par voie abiotique.

Les météorites sont des objets de dimensions très variables. Les plus petites passent inaperçues, celles qui sont un peu plus grosses se transforment en « étoiles filantes » en traversant l'atmosphère, et les vraiment grosses, les bolides, percutent le sol en y creusant des cratères.

© Getty Images

Étoile filante.

Il y a 65 millions d'années, une météorite dont le diamètre a été estimé à 10-15 km a creusé un cratère d'environ 200 km de diamètre dans la péninsule du Yucatan, au Mexique. Cet événement a eu un retentissement mondial : les effets combinés de l'obscurité due aux nuages de poussières et de l'effet de serre dû à l'apport de CO_2 généré par les feux de forêts, ont entraîné la disparition de nombreuses espèces comme les dinosaures. Mais les météorites n'apportent pas que désastres et désolation. Quand on analyse celles qui arrivent au sol en prenant soin de ne pas les contaminer avec des molécules terrestres, on découvre des molécules complexes très variées, parfois même des bases azotées et des acides aminés. Ces molécules contiennent des isotopes rares sur Terre, ce qui confirme leur origine extraterrestre. Mais d'où viennent-elles ?

Les météorites sont des fragments de roche expulsés lors d'un choc, qui finissent par tomber sur la Terre. La plupart proviennent des astéroïdes, des corps du Système solaire qui ont échappé à l'accrétion des planètes. La matière des astéroïdes a sans doute peu évolué depuis cette époque, et on considère que la composition des météorites reflète celle du nuage moléculaire qui est à l'origine du Système solaire. Les molécules organiques qu'elles contiennent se sont donc formées dans le milieu interstellaire.

Focus

La chimie du milieu interstellaire

Pour que deux atomes ou molécules réagissent chimiquement, il faut qu'ils se rencontrent avec suffisamment d'énergie cinétique pour qu'une barrière d'énergie soit franchie. Or le gaz interstellaire est extrêmement dilué, et sa température très basse, de l'ordre de – 200 °C à – 260 °C, implique que l'énergie cinétique de ses constituants est très faible. Mais la masse de la matière interstellaire est gigantesque, environ 10 % de celle de la Galaxie, et elle existe depuis très longtemps. Le rayonnement UV et les particules des rayons cosmiques fournissent l'énergie nécessaire, et les grains de la poussière interstellaire jouent le rôle de catalyseur.

Depuis 1941, 220 espèces chimiques polyatomiques différentes ont été découvertes dans le milieu interstellaire, depuis les petites molécules comme CN, CO ou H_2O jusqu'à d'autres beaucoup plus

grosses dont la masse molaire dépasse les 100 g mol^{-1}. Leur concentration est, bien sûr, extrêmement faible. Pour les détecter et les identifier, il faut faire appel aux observatoires infrarouges spatiaux et à des réseaux de télescopes terrestres très sensibles capables de capter les ondes émises par ces molécules. Dans ce domaine, l'observatoire NOEMA, constitué d'un réseau de douze antennes de 15 m de diamètre installé sur le plateau de Bure à 2 550 m d'altitude, est le plus performant de l'hémisphère Nord.

Photo Nathalie Lefaux

Le plateau de Bure (Hautes-Alpes) et les antennes paraboliques de 15 mètres de diamètre de l'observatoire NOEMA. Au fond, des randonneurs donnent l'échelle.

On n'a pas encore détecté de façon certaine d'acides aminés ni de bases azotées dans le milieu interstellaire. On étudie aussi la composition des astéroïdes et des comètes avec les spectroscopes des laboratoires terrestres et les instruments embarqués sur les stations orbitales. Une protéine, la glycine, a été identifiée dans la queue d'une comète. Plus récemment, des sondes spatiales ont été envoyées pour les étudier et ramener des échantillons, et de nombreuses molécules organiques ont été découvertes.

Que peut-on déduire de toutes ces informations ? Comme les autres planètes telluriques et la Lune, la Terre a été soumise au début de son histoire à un gigantesque bombardement de météorites de toutes tailles. Son intensité a ensuite décru jusqu'à atteindre son niveau actuel il y a environ 3,9 Ga. Tous ces corps ont pu ensemencer les océans en molécules organiques, en particulier en bases azotées et en acides aminés.

Un monde à ARN

Dans les années 1980, les biologistes américains Tom Cech et Sidney Altman ont montré que certains fragments d'ARN possédaient une activité catalytique sélective comme les enzymes, une découverte fondamentale qui leur a valu le prix Nobel de chimie en 1989. Ils ont appelé ces fragments « ribozymes », contraction d'acide **ribo**nucléique et d'en**zyme**. Les ribozymes peuvent catalyser de façon sélective des réactions aussi variées que la liaison des nucléotides, la liaison des acides aminés à l'ARN, l'autoréplication et des réactions d'oxydoréduction. Dans les êtres vivants actuels, ce sont des enzymes, donc des protéines, qui catalysent toutes ces réactions.

Les ribozymes peuvent donc remplir deux fonctions essentielles : stocker l'information biologique et catalyser leur propre réplication. On considère actuellement que les premiers organismes vivants utilisaient des ribozymes pour se répliquer et catalyser les réactions nécessaires pour se procurer de l'énergie : c'était « le monde à ARN ». Par la suite, des protéines se seraient avérées être des catalyseurs bien plus efficaces que les ribozymes, et des ARN auraient évolué vers l'ADN plus stable, capable de mieux conserver l'information génétique. Finalement, les ARN se seraient spécialisés dans la synthèse des protéines.

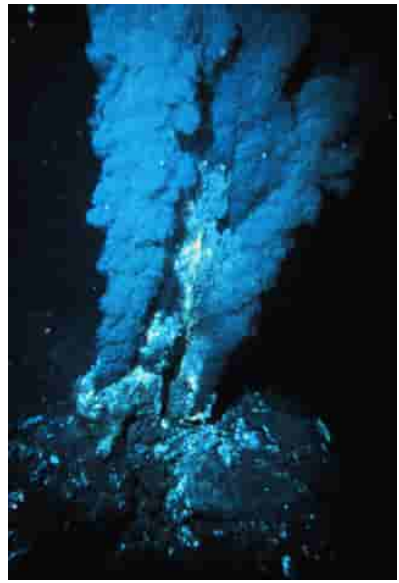
Les fumeurs des dorsales océaniques

L'exploration des dorsales océaniques a débuté en 1977, et ce qu'on y a découvert a bouleversé ce que l'on pensait sur les conditions nécessaires au développement de la vie. Ces chaînes de volcans sous-marins sont érigées par les épanchements de lave qui se produisent quand deux plaques de lithosphère s'écartent l'une de l'autre. Les laves de basalte forment des « coussins » et des « polochons » qui s'empilent et durcissent au contact de l'eau. On peut observer ce type de relief au mont Chenaillet, dans les Hautes-Alpes. C'est un fragment de dorsale océanique parfaitement conservé qui a été soulevé lors de la surrection des Alpes.

Laves en coussins et en polochons du mont Chenaillet (Hautes-Alpes).

Ces laves de basalte se sont épanchées au fond de l'océan alpin. La surrection des Alpes les a portées à près de 3 000 m d'altitude.

Dans l'océan Atlantique, les sommets des dorsales océaniques se trouvent à environ 2 500 mètres de profondeur. L'obscurité y est totale, la pression est égale à 250 bars et la température de l'eau atteint à peine quelques degrés. *A priori*, c'est un milieu très hostile pour les êtres vivants. Pourtant, on a découvert de véritables « oasis de vie » au voisinage des « fumeurs », des sortes de grandes cheminées d'où sortent des fluides hydrothermaux chargés de gaz et de minéraux.



Crédits Wikimedia Commons / NOAA

Fumeurs noirs de l'océan Atlantique.

Des micro-organismes exploitent leur énergie, et des écosystèmes très originaux basés sur la symbiose avec les micro-organismes se sont développés. On y trouve des mollusques, des crustacés et même des poissons. La découverte de ces micro-organismes a créé une révolution en biologie, en montrant que des êtres vivants pouvaient subsister et

se développer en utilisant l'énergie de réactions chimiques n'impliquant que des *composés minéraux*.

En 2018, des chercheurs français ont analysé une roche issue d'un forage effectué à 175 m de profondeur, à proximité d'un champ de fumeurs. Ils ont identifié un acide aminé, le tryptophane, et ont donné de solides arguments en faveur de son origine abiotique. Les dorsales océaniques se forment et disparaissent au gré des bouleversements créés par la tectonique des plaques, mais il en existait certainement lors de la formation des premiers océans, et il est tout à fait possible que des fumeurs aient produit des molécules de la vie avant la vie. Certains chercheurs vont même plus loin. Ils pensent que des formes de vie primitive ont pu apparaître dans les microcavités très particulières qui se trouvent dans certains fumeurs (voir le chapitre suivant).

La vie ailleurs ?

Toutes les formes de vie que nous connaissons sont tributaires de l'*eau liquide*, et c'est par sa recherche que débute la quête de traces de vie extraterrestre.

Dans le Système solaire ?

L'eau terrestre provient principalement du dégazage des roches du magma initial et de l'apport des comètes et des météorites. Ces mécanismes ont alimenté en eau les autres corps du Système solaire et l'eau y est abondante, surtout sous forme de glace. Sur Mercure et sur la Lune, les températures extrêmes de la surface ne sont pas compatibles avec la présence d'eau liquide, et les planètes géantes gazeuses peuvent être éliminées. Il reste donc leurs satellites, ainsi que Mars et Vénus.

Vénus est pudiquement enveloppée d'une atmosphère dense composée de dioxyde de carbone et d'un peu d'azote, dans laquelle flottent d'épais nuages faits de gouttelettes d'acide sulfurique et de vapeur d'eau. Cette couverture nuageuse diffuse la lumière du Soleil comme le fait celle de la Terre, et Vénus est l'astre le plus brillant du Système solaire après le Soleil et la Lune. L'effet de serre de l'atmosphère y est tel que la température moyenne de la surface est égale à 470 °C. La température est plus agréable dans les nuages, mais des études récentes indiquent que la concentration de l'eau y est trop faible pour que des bactéries, même les moins exigeantes, puissent y vivre. Les sondes envoyées prochainement sur Vénus devraient nous

en apprendre davantage.

Depuis 1964, Mars, notre plus proche voisine, a reçu la visite de nombreuses sondes spatiales. Où en sommes-nous en 2022 ? Nous savons que l'eau liquide était abondante sur Mars au début de son histoire, au point de remplir des lacs et des océans. Son atmosphère était relativement chaude et humide, et des formes de vie ont pu se développer à sa surface. L'atmosphère actuelle est très ténue, la pression partielle de la vapeur d'eau est extrêmement faible et la température de la surface dépasse rarement 0 °C. L'eau liquide pure ne peut pas y exister. Des traînées observées au flanc de certains cratères ont été attribuées à de l'eau très salée, mais cela doit être confirmé. On sait qu'il existe un grand lac d'eau liquide sous la calotte de glace qui recouvre le pôle sud, sans doute sous forme de saumure. Aucune trace de vie présente ou passée n'a encore été identifiée de façon certaine, mais les rovers continuent leurs investigations.

Photo Jérôme Astréoud

La planète Mars.

La teinte rougeâtre est due aux poussières d'oxydes de fer. La calotte polaire est faite d'eau gelée et de neige carbonique.

Les données obtenues par les sondes Voyager et Cassini ont considérablement enrichi nos connaissances sur les satellites des planètes géantes. En ce qui concerne la vie extraterrestre, les plus intéressants sont trois satellites de Jupiter (Ganymède, Callisto et Europe), deux satellites de Saturne (Encelade et Titan) et un satellite de Neptune (Triton). Précisons que Ganymède, Titan et Callisto ont à peu près la taille de Mercure, qu'Europe et Triton ont celle de la Lune alors qu'Encelade est nettement plus petit. Sous leurs surfaces glacées où la température est de l'ordre de – 200 °C, ces six satellites abritent des océans d'*eau liquide*. On l'explique par le dégagement de chaleur dû aux variations des énormes forces de marée auxquelles sont soumis ces satellites.

Photo Jérôme Astréoud

Jupiter, la plus grande planète du Système solaire.

Les bandes parallèles à l'équateur sont des nuages. L'alternance de bandes blanches et colorées traduit des différences d'altitude. La grande tache rouge est un gigantesque tourbillon de la taille de la Terre.

Focus

Effet de marée et production de chaleur

La forte attraction des planètes géantes génère des forces de marée considérables qui déforment leurs satellites. Cette attraction impose aussi aux satellites de tourner toujours la même face vers leur planète, comme c'est le cas pour la Terre et la Lune. Quand la trajectoire d'un satellite est circulaire, la déformation est permanente. Mais quand elle est elliptique, l'intensité des forces de marée et la déformation qui en résulte varient le long de la trajectoire, et les frictions internes produisent de la chaleur.

Les satellites de Saturne présentent des caractéristiques particulières. Sur Encelade, l'eau souterraine s'infiltre et remonte parfois jusqu'à la surface en produisant de gigantesques geysers. Titan est le seul satellite à posséder une atmosphère, constituée d'azote et d'hydrocarbures gazeux. Sa surface est couverte de rivières et de lacs de méthane et d'éthane qui témoignent d'une importante activité chimique. De nouvelles sondes devraient être envoyées prochainement vers ces deux satellites pour chercher d'éventuelles zones favorables à des êtres vivants.

Et pourquoi pas beaucoup plus loin ?

Si, te retirant dans le calme mystérieux

D'une nuit étoilée, tu relèves les yeux,

Quitte un instant la terre et tous ses vains émois,

Contemple, admire, juge, et compare, et dis-moi,
Dans cet entassement formidable et sublime
Des mondes sur ta tête. Oh, toi ! Infime atome,
Toi qui t'enorgueillis de porter le nom d'homme,
Sache donc reconnaître avec humilité
La profonde leçon de cette immensité.

Georgette Randon

Photo Jérôme Astréoud

Méditation devant la Voie lactée.

Nous voyons les planètes du Système solaire parce qu'elles nous renvoient une partie de la lumière qu'elles reçoivent du Soleil. La lumière renvoyée par les planètes d'autres étoiles est noyée dans celle de l'étoile et ces planètes sont généralement invisibles. Mais si on dispose d'instruments d'observation très performants et si on est très patient, on peut viser des étoiles et tenter de détecter les perturbations que la présence d'une planète pourrait produire sur elles. Ce peut être la faible oscillation provoquée par la présence d'une grosse planète proche de l'étoile, ou la faible variation de luminosité que produit le passage d'une planète devant l'étoile. L'étude détaillée de ces phénomènes permet d'évaluer la masse et la dimension de la planète, et sa distance à l'étoile. Dans les cas favorables, on peut même obtenir une information sur la présence d'une atmosphère et sa composition.

La première exoplanète a été découverte en 1995 à l'observatoire de Haute-Provence par deux chercheurs suisses, Michel Mayor et Didier Queloz. C'est une planète géante qui tourne autour d'une étoile de la constellation de Pégase. Cette découverte, qui leur a valu le prix Nobel de physique en 2019, a suscité de nombreuses vocations de « chercheurs d'exoplanètes ». Pour éliminer les perturbations dues à

l'atmosphère terrestre, les observations ont été faites à bord de stations orbitales et d'un satellite dédié, Kepler. En janvier 2022, 4 921 exoplanètes appartenant à 3 640 systèmes planétaires différents étaient répertoriées sur le site de l'Encyclopédie des planètes extrasolaires. La plupart des étoiles possèdent un système planétaire de composition très variable, et la dimension de la majorité des planètes est comprise entre celles de la Terre et de Neptune.

L'exemple de Vénus montre que la présence de vapeur d'eau dans l'atmosphère d'une planète ne prouve pas que l'eau liquide existe à sa surface. Il faut de plus que la masse de la planète, sa distance à l'étoile et l'intensité du rayonnement de l'étoile soient comprises dans certaines limites qui définissent la « zone habitable » de l'étoile. On a déjà trouvé de nombreuses exoplanètes dans cette zone, et la prochaine étape consistera à chercher d'éventuelles signatures de la vie dans leur atmosphère, comme des molécules de dioxygène.

Complément

www.lienmini.fr/39798-cpltsP294

Isotopes et datation radiométrique

L'univers fascinant des bactéries et des virus

> *L'être humain ne bénéficie d'aucun statut privilégié et ne constitue en rien l'apogée de l'évolution. Les bactéries ont de tout temps été la forme dominante de la vie.*
>
> *Stephen Jay Gould, L'Éventail du vivant. Le mythe du progrès*

Les deux derniers chapitres de ce livre illustrent l'extraordinaire diversité des êtres vivants et l'importance de leurs interactions. Ce chapitre est consacré aux plus petits, les bactéries, qui existaient déjà sur Terre il y a 3,5 milliards d'années et qui ont entièrement colonisé notre planète. Le suivant décrira les plus gros, les arbres, qui battent tous les records de longévité.

Qu'est-ce qu'une bactérie ?

Tous les micro-organismes ne sont pas des bactéries

L'univers observable par les êtres humains s'est considérablement élargi au XVII^e^ siècle. Du côté de l'infiniment grand, Galilée a découvert un nouveau monde en braquant sa lunette vers le ciel. Du côté de l'infiniment petit, Antonie Van Leeuwenhoek, un drapier bruxellois passionné par les microscopes, a découvert les micro-organismes. Les descriptions très précises qu'il a laissées montrent qu'il a observé des spermatozoïdes et des globules rouges, mais aussi des levures, des algues microscopiques, des protozoaires et… des bactéries.

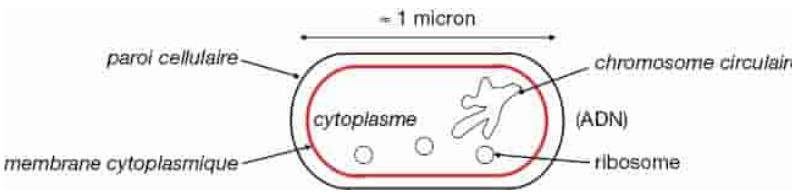
On appelle « micro-organismes » ou « microbes » les êtres vivants invisibles à l'œil nu mais que l'on peut observer au microscope optique. Cette définition recouvre des espèces très différentes sur le plan biologique.

Classification des micro-organismes.

Coquilles en chapeau chinois d'orbitolines, des anciens foraminifères « géants ».

Calcaire urgonien du massif des Dents blanches (Haute-Savoie).

Les êtres vivants sont classés en *procaryotes* et en *eucaryotes* en fonction de la nature de leurs cellules. Dans le tableau ci-dessus, seules les bactéries sont des procaryotes dont la cellule est représentée schématiquement sur la la première figure page suivante. L'ADN est un chromosome circulaire qui flotte dans le cytoplasme. Celui-ci est enveloppé par la membrane cytoplasmique, qui est elle-même entourée d'une paroi rigide.



La cellule procaryote.

La vie secrète des bactéries

Les nombreuses réactions chimiques qui ont lieu en permanence dans les cellules des êtres vivants sont coordonnées et régulées par le programme défini dans leur génome, et elles sont catalysées par des enzymes spécifiques. Chez tous les êtres vivants, l'énergie nécessaire à ces réactions est fournie par l'hydrolyse de l'*adénosine triphosphate* (ATP) en *adénosine diphosphate* (ADP) décrite par l'équation bilan :

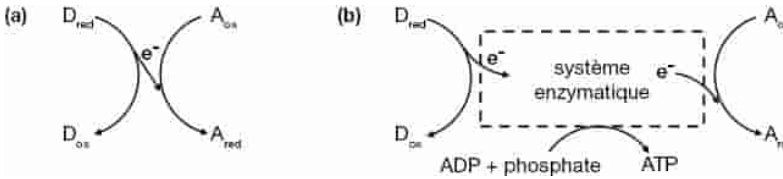
$$\text{ATP} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ADP} + \text{phosphate} + \text{énergie}$$

Pour *régénérer* l'ATP consommé, il faut faire fonctionner cette réaction en sens inverse en la couplant à un processus qui produise de l'énergie. Les processus mis en œuvre par les bactéries sont extrêmement variés.

• La plupart des bactéries utilisent l'énergie produite par des *réactions d'oxydoréduction*, dans lesquelles des électrons sont transférés d'un donneur D_{red} vers un accepteur A_{ox} :

$$D_{red} + A_{ox} \rightarrow D_{ox} + A_{red} + \text{énergie}$$

Quand la réaction a lieu en mélangeant D_{red} et A_{ox} (figure a), l'énergie produite est dissipée en chaleur. Mais elle peut être convertie en synthèse d'ATP grâce à un système enzymatique approprié (figure b).



Deux façons d'effectuer une réaction d'oxydoréduction.

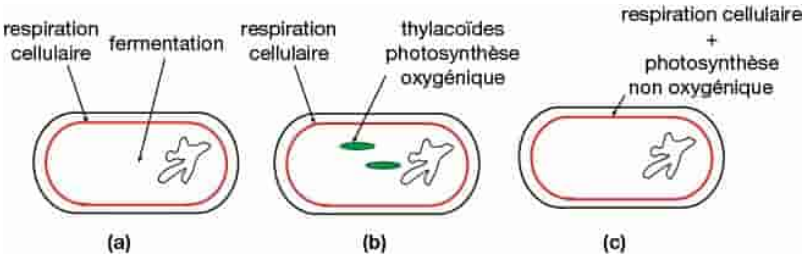
Les transferts d'électrons sont représentés par des flèches marquées **e**⁻.

La quantité d'ATP produite dépend de la nature du donneur et de l'accepteur, et de l'efficacité du système enzymatique. Les bactéries *aérobies* exploitent l'oxydation du glucose par le dioxygène de l'air, dont l'équation bilan s'écrit :

$$C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2 \rightarrow 6\ CO_2 + 6\ H_2O + \text{énergie}$$

Leur membrane cytoplasmique contient un système enzymatique très performant, la *chaîne respiratoire*, qui permet de produire beaucoup d'ATP (figure a ci-dessous). Quand elles sont privées de dioxygène, certaines bactéries aérobies peuvent utiliser d'autres accepteurs d'électrons, comme les ions nitrate ou sulfate. La production d'ATP est beaucoup plus faible, mais les bactéries survivent.

Les bactéries *anaérobies* vivent dans les milieux dépourvus d'oxygène. Certaines pratiquent des formes de respiration basées sur des donneurs d'électrons comme le sulfure d'hydrogène, le dihydrogène, l'ion Fe^{2+}, ou l'ammoniac. Les oxydants sont le CO_2, les ions sulfate et nitrate, ou encore des composés soufrés. D'autres pratiquent la *fermentation* grâce à un cocktail d'enzymes présent dans le cytoplasme (figure a). Le rendement est nettement inférieur à celui de la respiration aérobie.



Localisation des processus énergétiques des bactéries : respiration, fermentation et photosynthèse.

(a) La *respiration* utilise les chaînes respiratoires localisées dans la membrane cytoplasmique. La *fermentation* a lieu dans le cytoplasme.
(b) Les cyanobactéries possèdent des thylacoïdes, sièges de la *photosynthèse oxygénique*.
(c) La *photosynthèse non oxygénique* a lieu dans la membrane cytoplasmique.

• Les bactéries pourvues de pigments chlorophylliens se servent de l'énergie de la lumière pour extraire des électrons d'un donneur. Dans le cas de la photosynthèse *oxygénique* que pratiquent les *cyanobactéries*, le donneur est l'eau et l'équation bilan est l'inverse de celle qui figure en haut de la page 296) :

$$6\ CO_2 + 6\ H_2O + \text{énergie lumineuse} \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2$$

La phase lumineuse a lieu dans les thylacoïdes, des organites spécialisés présents dans le cytoplasme (figure b page précédente). Le glucose produit sert à construire des molécules complexes et à synthétiser l'ATP par la respiration. D'autres bactéries pratiquent des photosynthèses non oxygéniques dans lesquelles les donneurs d'électrons sont des sulfures ou des composés organiques. C'est le cas des *bactéries pourpres* et des *bactéries vertes*.

La diversité des processus énergétiques mis en œuvre par les bactéries témoigne de leur faculté d'adaptation à des environnements extrêmement variés, qui est due à la *plasticité* de leur génome. Les bactéries se répliquent par division, et leur génome est transmis tel quel aux cellules filles. Mais l'ADN bactérien, situé dans le cytoplasme, peut être facilement modifié par les mutations induites par les radiations UV ou certaines substances chimiques, ou par l'apport de gènes d'autres bactéries. Des systèmes de réparation de l'ADN existent, mais les bactéries « acceptent » volontiers les modifications qui leur sont bénéfiques.

Comment les bactéries ont-elles contribué à l'évolution biologique ?

Les bactéries étaient présentes sur notre planète il y a 3,5 Ga, et elles sont toujours là ! On pourrait penser qu'elles ont survécu aux

multiples catastrophes qui ont marqué l'histoire de la Terre et qu'elles ont assisté, sans y participer, à l'évolution des autres êtres vivants. En réalité, leur rôle a été essentiel.

Le très long monopole de la vie bactérienne

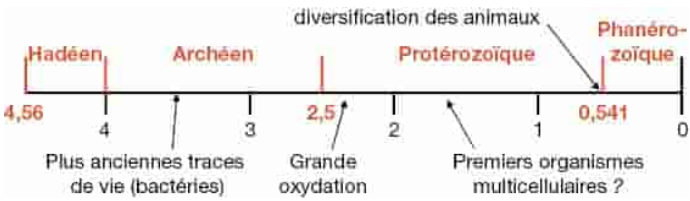
Les premières bactéries vivaient dans des océans dépourvus d'oxygène. Elles devaient tirer leur énergie de réactions d'oxydoréduction basées sur des composés minéraux, comme celles décrites dans la section précédente. La seule information disponible sur ce sujet va dans ce sens. On a découvert récemment des microfossiles filamenteux âgés de 3,4 Ga dans la formation de Barberton, en Afrique du Sud. Ils ont été attribués à des bactéries qui vivaient dans un environnement sous-marin hydrothermal, dont le métabolisme était basé sur le méthane et qui utilisaient des enzymes contenant du nickel.

Pendant plus d'un milliard d'années, la vie sur Terre a été exclusivement bactérienne et essentiellement anaérobie. Durant cette longue période, les bactéries ont pu « expérimenter » une grande diversité de processus énergétiques. La photosynthèse est apparue à proximité des rivages où la lumière éclaire les fonds marins. Sa version oxygénique, qui produit beaucoup d'ATP, était une expérience rentable mais très risquée : le dioxygène qu'elle génère est toxique pour les êtres vivants, et ce n'est qu'après l'acquisition d'un système de protection adéquat que des bactéries ont pu l'exploiter : ce sont les ancêtres des cyanobactéries actuelles, que nous nommerons « cyanobactéries » pour simplifier. Au début, le dioxygène qu'elles produisaient se combinait aux nombreuses substances réduites en solution, et sa concentration était très faible. Mais la surface des continents s'est étendue et, avec elle, celle des rivages où vivaient les cyanobactéries. La concentration du dioxygène a crû progressivement dans les océans, puis dans l'atmosphère où elle a atteint une valeur de l'ordre de 1 à 10 % de sa valeur actuelle il y a environ 2,4 Ga.

© Getty Images

Cyanobactéries (Nostoc) organisées en filaments vus au microscope optique.

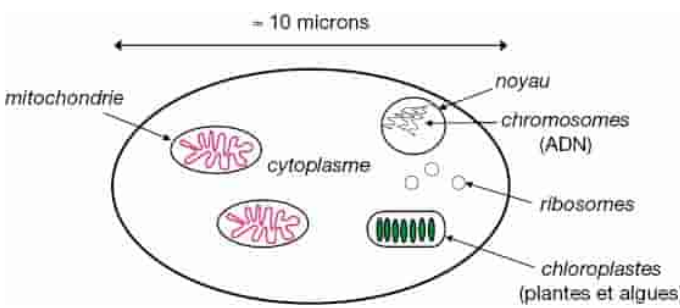
Cette « Grande Oxydation », qui a laissé des marques dans la composition des roches, a éliminé une grande partie des bactéries anaérobies. Inversement, elle a favorisé les espèces capables d'exploiter le dioxygène pour produire de l'ATP. Sous l'effet des radiations UV du soleil, une partie de l'oxygène atmosphérique s'est progressivement transformée en une couche d'ozone qui absorbe les UV. Cette protection a permis aux êtres vivants de sortir de l'eau et de coloniser les continents. Les traces de vie terrestres les plus anciennes sont des spores fossilisées de plantes voisines des mousses, datées de 480 millions d'années.



Quelques repères chronologiques.

Une association fructueuse entre procaryotes et eucaryotes

On ne sait pas exactement à quel moment sont apparues les cellules *eucaryotes*, dans lesquelles le matériel génétique est enfermé dans un *noyau*. La cellule eucaryote actuelle est beaucoup plus grande que la procaryote.



La cellule eucaryote actuelle.

La plus grande partie de l'ATP nécessaire au fonctionnement de la cellule est synthétisée au niveau des chaînes respiratoires situées dans la membrane interne des mitochondries. Les mitochondries et les chloroplastes possèdent de l'ADN qui n'est pas représenté. La correspondance avec les éléments équivalents des cellules procaryotes (figures de la page 296) est indiquée par la couleur.

La plus grande partie du génome est présente sous forme de chromosomes stockés dans un noyau entouré d'une membrane. Les

organismes eucaryotes tirent généralement leur énergie de l'oxydation du glucose par le dioxygène (voir l'équation bilan de la page 296). Cette réaction débute dans le cytoplasme par la *glycolyse*, et se poursuit dans les chaînes respiratoires situées dans la membrane interne des *mitochondries*. La cellule des plantes et des algues contient de plus des *chloroplastes*, sièges de la photosynthèse oxygénique.

Dans les années 1960, la microbiologiste américaine Lynn Margulis a souligné les similitudes structurales et fonctionnelles qui existent entre :

- les *mitochondries* des eucaryotes et *certaines bactéries aérobies*, d'une part ;
- les unités fonctionnelles des chloroplastes et les thylacoïdes des cyanobactéries, d'autre part.

Elle a aussi fait remarquer que les mitochondries et les chloroplastes possèdent de l'ADN qui sert à synthétiser certaines protéines, et elle a montré que tout cela s'expliquait si on admettait que les mitochondries et les chloroplastes étaient les descendants respectifs de bactéries aérobies et de cyanobactéries qui *ont pénétré* jadis dans une cellule eucaryote. Dans cette association, l'eucaryote fournissait « le gîte et le couvert », et les procaryotes produisaient de l'énergie. Cette hypothèse, dite de « *l'endosymbiose* », était très audacieuse à l'époque, et elle a mis du temps à s'imposer. Elle a été pleinement confirmée par l'étude détaillée de l'ADN des mitochondries et des chloroplastes.

Photo Jérôme Astréoud

Cellules d'une plante aquatique, l'élodée, et leurs chloroplastes.

Eubactéries et archaebactéries

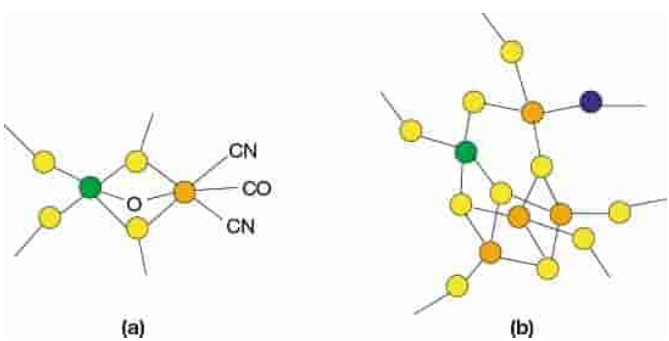
Pour comprendre comment les êtres vivants ont évolué, on cherche à établir des relations d'apparentement entre les espèces vivantes actuelles. En procédant de proche en proche, on construit des arbres

phylogénétiques qui font apparaître les ancêtres communs à un grand ensemble d'espèces. Alors que les arbres généalogiques montrent les liens de parenté entre *individus*, les arbres phylogénétiques révèlent les proximités entre *groupes d'espèces*. Pour déterminer les relations d'apparentement entre espèces, la méthode la plus générale et la plus efficace consiste à comparer leurs *génomes*.

Les nombreux arbres phylogénétiques qui ont été construits depuis une quarantaine d'années ont révélé que les êtres vivants que l'on désignait auparavant sous le nom générique de *bactéries* appartenaient en réalité à deux groupes de procaryotes nettement différents : les *eubactéries* (ou bactéries) et les *archaebactéries* (ou archées). Les différences portent principalement sur la nature de la paroi cellulaire et sur les mécanismes de transcription de l'ADN en ARN, et de traduction de l'ARN en protéines. Les mécanismes utilisés par les archaebactéries sont plus proches de ceux des eucaryotes que de ceux des eubactéries. Les archaebactéries fréquentent plus volontiers les milieux extrêmes : des températures très élevées (jusqu'à plus de 100 °C), une très grande acidité (pH $\approx$ 2) ou encore une très grande salinité.

Un dénommé LUCA

Les arbres phylogénétiques ont aussi révélé que tous les êtres vivants actuels – eubactéries, archaebactéries et eucaryotes – avaient un ancêtre commun qui a été baptisé LUCA, acronyme de « *Last Universal Common Ancestor* ». LUCA n'est pas le premier être vivant apparu sur Terre : c'est le dernier ancêtre commun dont les êtres vivants actuels gardent une trace dans leur génome, et cette trace donne des indications sur son mode de vie. LUCA était anaérobie et il aimait la chaleur, mais modérée. Il produisait de l'ATP en se servant de la réduction du CO_2 par le dihydrogène, grâce à des enzymes qui contenaient des centres métalliques semblables à ceux de la figure page suivante.



Centres métalliques de deux enzymes impliquées dans les systèmes de conversion de l'énergie de *bactéries actuelles*.

(a) Centre à nickel-fer des hydrogénases qui catalysent l'oxydation de H_2.
(b) Centre C de la CO déhydrogénase qui catalyse la réduction du CO_2.
Code couleur des atomes : Fe, orange ; Ni, vert ; S, jaune ; N, bleu. Les liaisons avec la protéine sont indiquées.

Il existe sur la dorsale médio-atlantique un champ de *fumeurs blancs* appelé « Lost City ». Ce sont de hautes cheminées d'aragonite et de silice qui se sont formées quand les péridotites, des roches du manteau supérieur, se sont transformées en serpentinite sous l'action de l'eau. L'eau qui sort des fumeurs blancs est modérément chaude, entre 40 et 90 degrés, et elle est très alcaline avec un pH de l'ordre de 9 à 11. Elle contient surtout du dihydrogène H_2 et du méthane CH_4. L'aragonite comporte un grand nombre de microcavités séparées par des parois poreuses, et ces parois sont tapissées de minéraux à base de fer, de nickel et de soufre dont la structure est très proche de celles représentées ci-dessus. Des flux hydrothermaux chargés de dihydrogène et de méthane traversent ces parois poreuses, reproduisant d'une certaine manière ce qui pouvait se passer dans la membrane organique de LUCA.

Il y a 4 milliards d'années, les océans devaient contenir beaucoup de CO_2. Leur eau était plus acide que celle des océans actuels, et des cheminées semblables à celles des fumeurs blancs étaient sans doute très nombreuses. Des chercheurs ont montré qu'un ensemble de réactions chimiques basées sur la réduction du CO_2 par H_2 et CH_4 a pu fonctionner *dans les parois* de ces fumeurs. Ces réactions auraient produit des molécules organiques, et des formes primitives de vie se seraient développées, qui auraient progressivement évolué vers LUCA. Elles auraient conservé dans leurs enzymes la structure des centres métalliques des parois, ce qui leur aurait permis de se procurer de l'énergie en utilisant les réactions chimiques qui avaient lieu dans les fumeurs.

Crédits Wikimedia Commons / NOAA

Fumeurs blancs dans l'océan Pacifique.

Bactéries et êtres humains : beaucoup d'alliés fidèles et … quelques ennemis ?

Environ 10 millions d'espèces de bactéries sont déjà répertoriées, et il en existe sans doute 100 ou 1 000 fois plus. On en trouve partout : dans l'air, l'eau, le sol, les roches, mais aussi dans les plantes, les champignons et les animaux. Les bactéries jouent un rôle essentiel sur notre planète en recyclant les éléments de base – oxygène, azote, soufre, phosphore et carbone – et en les rendant assimilables par les autres êtres vivants. Ce sont des bactéries qui possèdent les enzymes nécessaires pour transformer l'azote de l'air en composés azotés que les plantes peuvent assimiler. Il arrive que le hasard des mutations rende certaines bactéries *pathogènes* : elles déclenchent chez leurs hôtes des maladies, parfois très graves. D'un point de vue biologique, ces maladies ne les favorisent pas, puisqu'elles tendent à faire disparaître leurs hôtes. Les différents aspects des relations entre bactéries et êtres humains sont abordés dans ce qui suit.

Les bactéries de notre corps

Une étude parue en 2016 a montré que notre corps contient environ 30 000 milliards de bactéries, autant que le nombre de nos cellules. Elles appartiennent à plusieurs milliers d'espèces qui varient selon les individus. Ces bactéries sont soit inoffensives, soit bénéfiques. Le nouveau-né n'en possède pas : il les acquiert peu à peu au contact de sa mère, puis de son environnement. Notre bouche

contient beaucoup de bactéries. Parmi elles, certaines forment la plaque dentaire qui peut évoluer vers des caries.

Focus

Le baiser protecteur

Une étude très sérieuse réalisée en 2014 aux Pays-Bas a révélé que pendant un baiser de dix secondes, nous échangeons des dizaines de millions de bactéries avec notre partenaire, ce qui contribue à stimuler notre système immunitaire.

Il y a aussi beaucoup de bactéries sur nos yeux, dans notre nez et, naturellement, sur notre peau, où la sueur favorise le développement de bactéries et de champignons microscopiques. Mais c'est notre système digestif qui en héberge le plus grand nombre : avec d'autres micro-organismes, les bactéries constituent notre *microbiote* intestinal. C'est là que les interactions entre notre organisme et les bactéries sont les plus fortes. Elles déterminent en grande partie notre état de santé, nos capacités de défense contre les pathogènes et même notre humeur…

Les phénomènes symbiotiques impliquant les bactéries et, plus généralement, les micro-organismes, concernent pratiquement tous les êtres vivants. Dans le cas des arbres dont il est question au chapitre suivant, l'association des racines avec les filaments du mycélium, les hyphes, produit des organes qui jouent un rôle essentiel dans la nutrition et la protection des deux partenaires : les mycorhizes.

Les bactéries pathogènes

Une cinquantaine d'espèces de bactéries sont responsables de maladies infectieuses. On peut citer la tuberculose, qui tue chaque année près de deux millions de personnes dans les pays du Sahel, la pneumonie, le tétanos, la typhoïde, la diphtérie, la syphilis, le choléra, la lèpre. La première barrière contre les bactéries pathogènes est notre *peau* et les bactéries qu'elle héberge. Celles-ci agissent en privant les intrus de ressources, parfois même en sécrétant des substances toxiques. Les plaies constituent des brèches dans la défense, et notre système immunitaire, éventuellement stimulé par un vaccin, doit alors prendre le relais.

Les *antibiotiques* sont des molécules produites par des êtres vivants ou synthétisées en laboratoire, qui tuent les bactéries pathogènes ou ralentissent fortement leur croissance, sans affecter l'hôte infecté.

Focus

Alexander Fleming

Alexander Fleming a découvert les antibiotiques par hasard en 1928 : constatant que ses cultures de bactéries ne poussaient pas au contact d'une moisissure nommée *Penicillium notatum*, il montra que la responsable était une molécule synthétisée par la moisissure, qu'il nomma *pénicilline*. Cette découverte lui valut le prix Nobel en 1945.

Les champignons, les végétaux, les lichens, les animaux et même certaines bactéries synthétisent des antibiotiques pour se défendre contre les bactéries pathogènes. On en connaît un grand nombre, mais seuls une centaine sont utilisés en médecine. Certains antibiotiques agissent en empêchant la formation de la paroi cellulaire ou en détruisant la membrane cytoplasmique des bactéries, d'autres en inhibant la synthèse de l'ADN ou la synthèse des protéines. On estime que depuis cinquante ans, l'emploi des antibiotiques a prolongé notre espérance de vie d'une dizaine d'années.

© Getty Images

Cultures de bactéries non pathogènes pour la recherche scientifique.

La *résistance aux antibiotiques* est un phénomène général qui apparaît après quelques années ou dizaine d'années d'utilisation. Les populations bactériennes ne sont jamais parfaitement homogènes. Par mutation ou par échange de gènes, certains individus acquièrent des gènes qui leur permettent de résister à un antibiotique. Ces individus sont sélectionnés en présence de l'antibiotique et transmettent la résistance à leurs descendants. Il faut donc éviter de banaliser l'usage des antibiotiques, en étant conscients qu'ils ne sont pas efficaces contre les virus et que les traitements trop courts favorisent la sélection de bactéries résistantes. Une autre manière de se protéger consiste à se faire vacciner (voir ci-après).

L'exploitation des bactéries

Les êtres humains se sont aperçus très tôt que l'on pouvait conserver le lait en le faisant cailler et en l'égouttant. Des fresques mésopotamiennes datées de 3 000 ans avant notre ère représentent la traite du lait et des claies d'égouttage, et une dizaine de fromages différents sont mentionnés dans les textes. On faisait cailler le lait avec la *présure* extraite de la panse de jeunes ruminants. De nos jours, on utilise directement l'enzyme de la présure, la *chymosine*. Certaines bactéries pratiquent la fermentation lactique qui transforme le lactose du lait en acide lactique. La sélection des bactéries et la température déterminent la nature du produit laitier final, et la diversité des fromages reflète en grande partie celle des micro-organismes qui participent à l'affinage.

Les bactéries participent à l'élaboration de tous les produits laitiers.

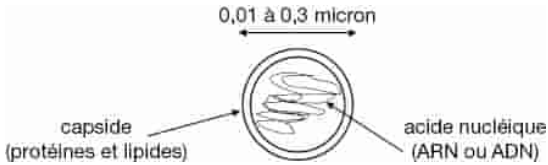
L'acidité générée par la fermentation lactique limite la croissance des autres bactéries. Cette propriété est utilisée pour conserver la choucroute, les condiments et les salaisons. Elle intervient aussi dans l'ensilage du fourrage. Précisons que ce sont des levures qui pratiquent la fermentation alcoolique dans laquelle des sucres sont transformés en alcool avec dégagement de CO_2, et que c'est le CO_2 qui fait « lever » la pâte à pain.

L'utilisation des bactéries dans l'industrie présente bien des avantages : il existe des espèces adaptées à chaque milieu, elles se répliquent très vite et ne se mettent jamais en grève. On les met à contribution dans le traitement des eaux usées et des marées noires ainsi que dans la dépollution des friches industrielles. On s'en sert aussi pour extraire des métaux de minerais à faible teneur et de déchets miniers. C'est ce qu'on appelle la *biolixiviation*. Les bactéries ont un autre avantage : leur génome peut être facilement modifié pour produire les protéines désirées. Dès les années 1980, des bactéries génétiquement modifiées ont commencé à travailler dans l'industrie

pharmaceutique pour produire de l'interféron, de l'hormone de croissance humaine, de l'insuline, et des anticorps. Dans l'avenir, des bactéries pourraient remplacer les pesticides et dégrader certaines matières plastiques.

Qu'est-ce qu'un virus ?

Une particule virale se réduit à un acide nucléique enfermé dans une capside.



Représentation schématique d'une particule virale.

Elle se réplique en parasitant une cellule vivante et en utilisant son équipement enzymatique. Pour cela, elle se fixe de façon spécifique sur la cellule cible et lui injecte son acide nucléique. La cellule le réplique et réalise la synthèse des protéines virales. Des particules, les virions, sont reconstituées en de nombreux exemplaires. La cellule finit par éclater et libérer les virions.

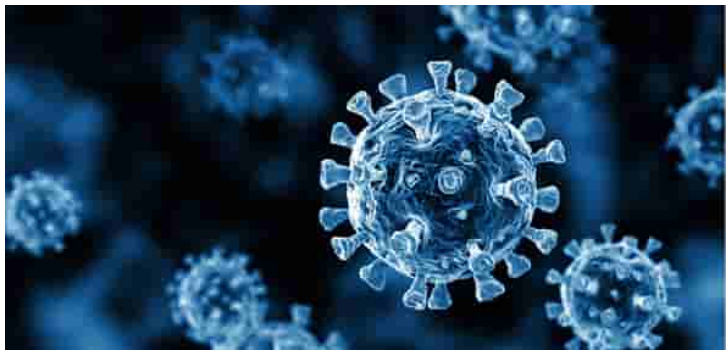
Les virus peuvent infecter tous les êtres vivants : les animaux, les plantes, les champignons, les algues, et même les bactéries. On en trouve donc à peu près partout, en particulier dans les océans : un millilitre d'eau contient en moyenne 10 millions de virus. La plupart ont pour cible des eubactéries et des archées, mais les eucaryotes sont aussi visés : algues, mollusques, arthropodes, poissons, mammifères. Leur impact sur le monde aquatique est très important. Les virus participent à la destruction des espèces dominantes au profit d'espèces plus rares, ce qui favorise en particulier la biodiversité du plancton.

Les virus et nous

Notre corps contient un très grand nombre de virus, beaucoup plus que de bactéries. La plupart sont des bactériophages, c'est-à-dire qu'ils infectent des bactéries. Ils régulent les populations bactériennes, en particulier celles du microbiote intestinal.

On connaît actuellement une centaine de virus responsables de maladies humaines. C'est le cas de la grippe, de la rage, de la poliomyélite, de la varicelle, de la variole, de la rougeole, de la

mononucléose ou encore de l'hépatite C. Plus récemment sont apparus le virus Ebola, les coronavirus et le VIH, le virus du SIDA. Ce dernier est particulièrement pernicieux, puisqu'il a pour cible des lymphocytes de notre système immunitaire. Son acide nucléique s'incorpore à l'ADN de leurs noyaux, et la réplication a lieu quand les lymphocytes sont mobilisés par une infection microbienne. Ceux-ci sont détruits au moment même où notre organisme en a le plus besoin. Certaines maladies virales se soignent avec des *antiviraux*, des médicaments qui perturbent la réplication des virus. Certains empêchent le virus d'injecter son ADN ou son ARN dans la cellule, d'autres bloquent le début de la réplication, d'autres encore rendent non fonctionnels les virions produits dans la cellule.



© Getty Images

Reconstitution en image du virus SARS-COV-2.

Le rôle des vaccins est très différent : il consiste à apprendre à notre système immunitaire à identifier les *antigènes*, c'est-à-dire les virus et les bactéries pathogènes, de façon à les faire éliminer par les *anticorps*, des immunoglobulines synthétisées par les lymphocytes. Pour ce faire, on injecte un antigène dont la virulence a été atténuée ou supprimée. Sa présence déclenche la synthèse de « cellules mémoire » qui le reconnaîtront lors d'une infection ultérieure. Le principe des vaccins à ARN messager est un peu différent. Il consiste à faire synthétiser par notre organisme une protéine typique de l'agent pathogène, en lui injectant l'ARN messager qui lui correspond. La synthèse se fait au niveau des ribosomes du cytoplasme des cellules, et ne peut pas interférer avec notre matériel génétique qui est enfermé dans le noyau. Dans le cas du SARS-COV-2, la protéine synthétisée est la protéine Spike qui permet au virus de se fixer sur nos cellules et de les infecter.

Le contact prolongé d'une population avec les bactéries et les virus pathogènes finit par produire une immunité acquise chez les individus survivants. Au XVI^e^ siècle, les populations amérindiennes ont été

décimées par des épidémies dues à des bactéries et à des virus apportés par les Européens, qui étaient eux-mêmes en contact avec ces pathogènes depuis des milliers d'années.

Un nouveau regard sur nous-mêmes

Nous sommes liés de façon très intime aux bactéries. Par notre microbiote, bien sûr, mais aussi par nos mitochondries : chacune de nos cellules contient plusieurs centaines de ces descendants de bactéries qui ont pénétré jadis dans une cellule eucaryote. Mais il y a plus étonnant. Jusqu'à une date récente, nous pensions que la composition de notre génome résultait de mécanismes héréditaires : nos gènes étaient un legs de nos ancêtres. Nous savons aujourd'hui que notre génome contient de nombreux gènes d'origine bactérienne, certains même d'origine virale ! Ces gènes ont été acquis au cours de l'évolution des mammifères à l'occasion d'infections microbiennes et virales. Aucun auteur de science-fiction, même les scénaristes des films de la saga *Alien*, n'aurait osé inventer un tel scénario de nos origines.

La force tranquille des arbres

Quelques dizaines de mètres de forêt suffisent pour abolir le monde extérieur, un univers fait place à un autre, moins complaisant à la vue, mais où l'ouïe et l'odorat, ces sens plus proches de l'âme, trouvent leur compte. Des biens qu'on croyait disparus renaissent : le silence, la fraîcheur et la paix.

Claude Lévi-Strauss, Tristes Tropiques

L'arbre est un symbole de puissance et de vitalité. Ceux que l'on plante à l'occasion de la naissance d'un enfant font un peu partie de la famille : on surveille leur croissance et on aime à les caresser. Les arbres plantés pour commémorer une date importante ont un caractère plus officiel : on les respecte et ils ont droit à un panneau de présentation.

Photo Alain Bertrand

Le Gros Tilleul de Samoëns (Haute-Savoie).

Il a été planté en 1438 pour commémorer la reconnaissance de la communauté par le duc de Savoie Amédée VIII.

Qu'est-ce qu'un arbre ?

Les arbres sont des *végétaux,* c'est-à-dire des êtres vivants dont les cellules possèdent une paroi à base de cellulose et qui pratiquent la photosynthèse oxygénique. Les végétaux comprennent les *plantes* (terrestres) et les *algues vertes*. Les champignons, qui ne pratiquent pas

la photosynthèse, ne sont pas des plantes, pas plus que certaines bactéries qui la pratiquent mais dont la paroi cellulaire est différente. On distingue les plantes *ligneuses,* qui possèdent une structure en bois, et les plantes *herbacées*.

Focus

La composition du bois

Le bois est fait de cellulose (environ 50 %), de lignine (de 20 à 30 %), d'hémicellulose (15 à 25 %) et d'autres substances organiques auxquelles s'ajoutent des composés minéraux. La cellulose, un polymère de glucose, est le principal constituant de la paroi des cellules végétales. La lignine, un polymère polyphénolique, forme un tissu intercalaire qui donne aux plantes leur rigidité.

Les *arbres* sont des plantes ligneuses dont la structure est ramifiée. On parle d'arbuste quand l'arbre est plus petit que 7 m et d'arbrisseau quand il est plus petit que 4 m. La difficulté en botanique, c'est qu'on utilise souvent des termes descriptifs liés à l'aspect extérieur des plantes alors que la taxinomie repose sur des critères *génétiques.* Par exemple, le bambou et la canne à sucre sont des plantes ligneuses non ramifiées, mais tous deux appartiennent à la famille des *graminées* qui comporte surtout des plantes herbacées. De même, le fraisier est une plante herbacée, le framboisier un arbrisseau et le cerisier un arbre, et ces trois espèces sont des *rosacées.*

La structure arborescente, qui facilite le captage de la lumière et la dispersion des graines, a été adoptée à plusieurs reprises au cours de l'évolution. L'étude des fossiles a révélé que d'immenses forêts existaient déjà il y a 380 Ma. La plupart de ces arbres ont disparu, mais des représentants de groupes très anciens existent toujours : la classe des conifères (gymnospermes) est apparue au Carbonifère il y a 350 Ma, et la famille des ginkgos il y a 265 Ma. Les feuillus (angiospermes) ne sont apparus qu'au début du Crétacé, il y a environ 130 Ma.

Les arbres détiennent tous les records

Le plus gros animal vivant actuellement est la baleine bleue, qui peut atteindre 30 mètres de long pour une masse de 180 tonnes. Elle dépasse sans peine les 7 tonnes de l'éléphant et même les plus gros dinosaures, dont la masse a été estimée à 70 tonnes. Mais les arbres peuvent être beaucoup plus grands et beaucoup plus gros. Les arbres

records se trouvent dans les forêts de séquoias de Californie. Le plus gros, « Général Shermann », est un séquoia géant de 85 mètres, dont la masse est évaluée à 1 300 tonnes. Il est âgé de 2 200 ans environ. Le plus haut est « Hypérion », un séquoia à feuilles d'if qui atteint 116 mètres, la hauteur du premier étage de la tour Eiffel. Il n'a que 800 ans et tout l'avenir devant lui. Les pins de Californie sont moins grands, mais certains ont 4 900 ans. Il semble que les arbres les plus vieux soient des épicéas suédois âgés de 8 000 ans.

Un jeune séquoia géant dans les Hautes-Alpes.

Cet individu ne bénéficie pas des mêmes conditions climatiques que les séquoias de Californie, et il n'atteindra sans doute jamais leur hauteur.

En France, les arbres les plus hauts sont des sapins de Douglas. Le record est détenu par un individu des monts de la Madeleine de 67 mètres, qui a été planté en 1872. Les célèbres sapins de la forêt de la Joux, dans le Jura, atteignent 60 m et ont environ 200 ans. Dans notre pays, les arbres les plus vieux sont des ifs âgés de 1 700 ans. Les châtaigniers et les chênes peuvent vivre aussi très longtemps, jusqu'à 900 ans.

Comment vivent les arbres ?

Les deux sèves

Comme toutes les plantes, les arbres utilisent l'énergie de la lumière

pour synthétiser des molécules organiques à partir d'eau et de dioxyde de carbone. C'est la photosynthèse oxygénique, dont le bilan a été décrit à propos des cyanobactéries. Chez les arbres, ces réactions ont lieu essentiellement dans les cellules des feuilles, qu'il faut donc alimenter en eau : c'est la *sève brute* (ou montante) chargée en sels minéraux, qui est puisée dans le sol au niveau des racines et distribuée à toutes les feuilles par un réseau de vaisseaux très fins, le *xylème*. Seuls 5 % de l'eau sont consommés par la photosynthèse, la plus grande partie est évacuée par *évapotranspiration*. Les molécules produites, principalement des sucres et des acides aminés, sont injectées dans la *sève élaborée* (ou descendante) qui est distribuée à toutes les cellules, y compris celles des racines, par un autre réseau de vaisseaux, le *phloème*. Les cellules utilisent l'oxydation des sucres pour produire de l'ATP, et le surplus est stocké sous forme d'amidon. Les deux réseaux de sève des végétaux sont les équivalents du réseau sanguin des animaux.

Focus

Déguster la sève

Au début du printemps, la première sève montante est enrichie en sucres stockés dans l'arbre, en particulier dans les racines. C'est en la concentrant que l'on obtient le sirop d'érable au Québec. Dans les Alpes, on prélève la sève des bouleaux, qui aurait le pouvoir de « revitaliser les organismes ».

Récolte de la sève de bouleau en mars.

L'ascension de la sève

Plusieurs phénomènes contribuent à faire monter la sève brute vers

les feuilles :

• les racines possèdent une multitude de *poils absorbants* qui contiennent une solution concentrée de macromolécules. La membrane des poils est semi-perméable, et l'eau du sol chargée en sels minéraux y pénètre par osmose. La pression osmotique, qui peut atteindre plusieurs bars, fait monter la sève brute ;

• la capillarité intervient dans les fins vaisseaux du xylème ;

• la plus grande partie de l'eau qui arrive dans une feuille pénètre dans une multitude de pores très fins, les *stomates*, et s'évapore à la surface de la feuille comme la sueur à la surface de notre peau. Cette évaporation refroidit la feuille et produit une diminution de pression qui permet d'aspirer l'eau du xylème. C'est l'*évapotranspiration* que les feuilles régulent en ouvrant plus ou moins leurs stomates en fonction de leur besoin en eau.

Le système d'aspiration de la sève des arbres est très efficace. On estime qu'un chêne peut élever 200 litres d'eau à 30 mètres de haut en une journée. La plus grande partie de l'eau prélevée dans le sol est rejetée sous forme de vapeur dans l'atmosphère, et c'est ainsi que les arbres participent au cycle de l'eau. Ils maintiennent aussi un air humide et frais dans les forêts.

Les feuilles

Les feuilles sont de véritables usines chimiques qui fonctionnent à l'énergie solaire. Leurs nervures, qui prolongent la tige, contiennent les extrémités du xylème et du phloème, les réseaux qui conduisent les deux types de sèves. La partie supérieure des feuilles est souvent plus foncée, car les cellules y sont plus riches en chloroplastes, les organites où a lieu la photosynthèse. La partie inférieure est percée des stomates où a lieu l'évapotranspiration. Ils assurent aussi les échanges des gaz liés à la photosynthèse : entrée du dioxyde de carbone et sortie de l'oxygène.

On peut se demander pourquoi certains arbres perdent leurs feuilles en automne et d'autres pas. L'eau contenue dans les feuilles pourrait geler en hiver et différentes adaptations se sont développées pour l'éviter.

• Chez les arbres à feuilles caduques, une horloge interne déclenche le dépérissement et la chute des feuilles. La diminution de la durée du jour et l'abaissement de la température interviennent aussi. Pendant la saison froide, ces arbres vivent au ralenti grâce à leurs réserves d'amidon. Bien entendu, ils doivent fabriquer de nouvelles feuilles au printemps.

• Les arbres à feuilles persistantes vivent au ralenti en hiver, en optimisant la photosynthèse. C'est le cas des conifères, dont les feuilles faites d'une multitude de fines aiguilles captent la lumière dans toutes les directions. Elles sont recouvertes d'une cuticule très épaisse qui les protège du froid. Chez les espèces qui vivent en montagne ou dans les régions boréales, la sève très riche a un effet antigel. Le cas des chênes verts et des kermès des garrigues est encore différent. Ils sont soumis à des hivers relativement doux, et le rôle de la cuticule qui recouvre leurs feuilles est plutôt de limiter l'évaporation pendant les étés secs.

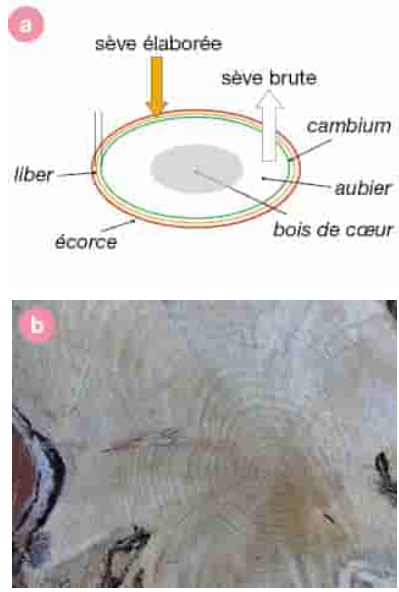
Focus

Le feuillage limite le ruissellement

Le feuillage des arbres favorise l'alimentation des sources et des nappes phréatiques. Quand il pleut, les feuilles interceptent une partie importante des précipitations, qui tombent moins fort sur le sol. L'eau imprègne la litière de feuilles mortes et l'humus, ce qui facilite sa pénétration. La rétention de l'eau freine le ruissellement et ralentit l'érosion des sols.

La croissance des arbres

Chaque année, la masse de bois d'un arbre augmente par l'épaississement du tronc et des branches existantes, et par la croissance et la ramification de ses extrémités. Le bois du tronc et des branches est structuré en couches concentriques. Le bois de cœur, fait de cellules mortes, est entouré de l'*aubier* plus récent, qui contient les vaisseaux ligneux du xylème. Le *cambium* élabore le bois de l'année. Sa partie externe, le liber, contient les vaisseaux du phloème. L'ensemble est ceinturé par l'écorce, une couche protectrice de liège étanche à l'eau et imperméable à l'air, qui se renouvelle par sa partie interne (figure a ci-dessous). La zone qui est renouvelée chaque année est repérée par deux traits sur la figure. Sur une coupe, la partie produite en été apparaît plus foncée et plus étroite que celle produite au printemps (figure b).



Structuration du bois du tronc et des branches.

(a) La structure en couches. Les deux traits indiquent la partie renouvelée chaque année.
(b) Coupe d'une souche de pin sylvestre. Les spécialistes « lisent » les péripéties de sa vie dans les cernes.

On peut donc évaluer l'âge du bois en comptant les zones foncées que l'on appelle les *cernes*. Quand l'arbre est sur pied, on effectue le comptage sur une « carotte » prélevée en bas du tronc, et on la remet en place.

Chez les vieux arbres, le bois de cœur et une partie de l'aubier sont souvent attaqués par des micro-organismes, des champignons, des insectes ou des oiseaux. Les réseaux de sève fonctionnant en périphérie, cela n'empêche pas ces « arbres creux » de vivre ni de se développer. Ces cavités favorisent la biodiversité dans les forêts.

L'architecture d'un arbre est déterminée en grande partie par son génome : la silhouette d'un épicéa n'est pas la même que celle d'un feuillu ni d'un sapin. Mais elle doit aussi s'adapter à la nature du sol, à la pente du terrain et surtout au voisinage des autres arbres.

Même après leur mort, les arbres continuent de nous étonner : cobra, land art et dragon de la forêt.

Qu'est devenue la forêt qui couvrait autrefois la France ?

On croit souvent que les forêts actuelles sont ce qui reste de la forêt qui couvrait jadis tout notre pays, et que leur localisation est déterminée par des facteurs naturels comme le sol, le climat et l'altitude. Il est vrai qu'une altitude élevée exerce de fortes contraintes sur la végétation.

Le nerprun nain (*Rhamnus pumila*), un sous-arbrisseau adapté à l'altitude.

La température s'abaisse et la densité de l'air diminue, ce qui accroît le contraste thermique entre le jour et la nuit. Les vents sont plus forts et l'enneigement plus long. Tout cela contribue à raccourcir

la période végétative, et explique l'étagement de la végétation observé sur les versants des montagnes, qui varie d'ailleurs beaucoup selon leur exposition.

Mais dans notre pays où les forêts sont exploitées depuis très longtemps, ce sont surtout des facteurs humains qui déterminent leur répartition. L'étude des pollens enfouis dans le sol a révélé que la forêt s'était développée dans nos contrées à partir de la fin de la glaciation du Würm, il y a environ 12 000 ans, jusqu'à couvrir pratiquement les trois quarts du territoire. Or elle n'en occupe plus que 31 % après avoir failli disparaître à la fin du XVIIIe siècle. Ces variations très importantes sont dues aux changements intervenus dans les activités liées à la forêt.

L'exploitation intensive de la forêt

Au Néolithique, environ 6 000 ans avant notre ère, les progrès de l'outillage et le réchauffement climatique ont favorisé le développement de l'agriculture et de l'élevage, ce qui a conduit à la sédentarisation et au défrichement. Des bergers occupaient déjà des sites d'altitude dans les Alpes 4 500 ans avant J.-C., et on pense qu'ils déboisaient en employant le feu. Le déboisement s'est accéléré à l'âge des métaux, surtout après l'arrivée des Celtes vers 600 avant J.-C. Quand les Romains ont envahi la Gaule, la forêt ne couvrait déjà plus que les deux tiers environ du territoire. Le site de l'oppidum de Bibracte sur le mont Beuvray, en Bourgogne, avait certainement été choisi en raison de la vue dégagée qu'il offrait sur toute la région. Il est actuellement enfoui dans la forêt, et les visiteurs qui croient voir les restes de la fameuse forêt gauloise sont déçus en lisant les panneaux explicatifs.

Focus

Le mythe de la forêt gauloise

« Non, la Gaule, ce n'est pas la forêt éclairée par la lune, vaguement percée de loin en loin. C'est un pays largement défriché, au moins depuis le IIIe siècle avant J.-C. Les prospections archéologiques ont retrouvé des vestiges gaulois ou gallo-romains au cœur de forêts actuelles, réputées avoir été mises en culture au Moyen Âge et délaissées ultérieurement. »

Christian Goudineau

La surface boisée de notre pays, déjà amputée du temps des

Gaulois, a continué à diminuer au Moyen Âge sous les effets de la pression liée à l'accroissement démographique. Le bois était alors la principale matière première. On l'utilisait pour construire les bâtiments et se chauffer, mais aussi confectionner l'outillage et construire des charrettes. Il fallait défricher pour augmenter les surfaces cultivées et pâturées. La déforestation s'est accélérée lors de la « révolution agricole » des XIe et XIIIe siècles, et la forêt ne couvrait déjà plus que le quart du territoire à la fin de cette période. La forêt regagna un peu de terrain pendant la guerre de Cent Ans et au moment de la Grande Peste, mais le défrichement reprit ensuite de plus belle. Les premières industries qui se sont développées au XVIe siècle – mines, forges, verreries, salines – consommaient beaucoup de bois. Au XVIIe siècle, Colbert dut réglementer l'exploitation des forêts pour réserver le bois de qualité à la construction navale, et il en fit planter de nouvelles comme la belle futaie de chênes de Tronçais dans l'Allier. Mais la réglementation est vite tombée en désuétude, et la surface forestière a continué à décroître jusqu'à atteindre 15 % du territoire à la fin du XVIIIIe siècle.

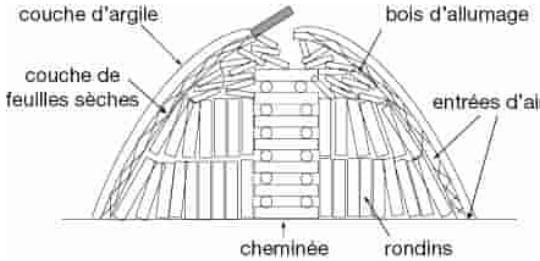
Un grand consommateur de bois : le charbon de bois

Le charbon de bois est le résultat de la pyrolyse du bois. C'est du carbone presque pur qui brûle à l'air en dégageant beaucoup de chaleur. Grâce à sa structure poreuse, la chaleur y reste concentrée et la température peut atteindre 800 à 1 000 °C. Jusqu'au XIXe siècle, c'était le seul combustible de bonne qualité directement utilisable dans les fours des potiers, des verriers et des briquetiers, et surtout dans les nombreuses forges où on travaillait le fer. Chaque village avait son « travail » pour ferrer les bœufs et les chevaux.

Deux enseignes de maréchal-ferrant et un ancien « travail » d'un village de Lozère.

De nombreux artisans utilisaient des forges : les couteliers, les charrons et les taillandiers qui fabriquaient tout ce qui « taille » : ciseaux à bois, scies et lames de faux. Le charbon de bois n'est pas seulement un excellent combustible, c'est aussi ce qu'on appelle en chimie un « réducteur » : à haute température, il réagit chimiquement avec des minerais, les oxydes métalliques, ce qui permet d'extraire les métaux. C'est grâce au charbon de bois que la métallurgie a pu se développer dès l'époque préhistorique.

Pour satisfaire cette forte demande, il fallait de grands moyens. Les charbonniers construisaient d'énormes meules pour chauffer une grande quantité de bois à l'abri de l'air. Les plus grosses pouvaient atteindre 10 mètres de diamètre pour 2 à 3 mètres de hauteur. Cela représente environ une dizaine de tonnes de bois qu'il fallait couper et transporter jusqu'à un endroit bien dégagé. Les rondins étaient soigneusement empilés autour d'une « cheminée » et l'étanchéité vis-à-vis de l'air était assurée par une épaisse couche de feuilles recouverte de terre ou d'argile.



Coupe schématique d'une meule de charbonnier.

Une fois la construction terminée, on enflammait le bois de la « cheminée » et on le faisait brûler plusieurs jours. À l'intérieur, le bois commençait par sécher, puis la pyrolyse prenait le relais et se propageait lentement de haut en bas. Le charbonnier suivait la progression en observant la fumée : la combustion produit une fumée noire, alors que la pyrolyse donne une fumée plus claire, presque transparente. Il contrôlait la « cuisson » en ouvrant ou en fermant des entrées d'air disposées dans la meule, ce qui nécessitait une surveillance constante pendant plusieurs semaines. Quand la pyrolyse était terminée, il fallait attendre que la température baisse avant d'ouvrir. En effet, le charbon de bois trop chaud s'enflamme spontanément au contact de l'air. La meule se met alors à brûler, le charbon de bois se consume et tout le travail est perdu ! Sans parler du danger d'incendie de forêt. Le rendement dépendait beaucoup de la technique du charbonnier et du bois utilisé, le chêne étant le plus recherché. On pouvait récupérer jusqu'à 15 à 20 % de la masse de bois initiale sous forme de charbon de bois.

On peut se demander pourquoi on utilisait le charbon de bois de préférence à la houille ou à d'autres types de charbon. On a commencé à ramasser et utiliser le « charbon de terre » dès le Moyen Âge. Son exploitation systématique a débuté au XVI^e^ siècle, quand la pénurie de bois a entraîné la « flambée » des prix du charbon de bois. Mais des méthodes d'extraction efficaces n'ont été mises en œuvre qu'à la fin du XVIII^e^ siècle, au moment de la révolution industrielle. La pyrolyse de la houille donne du coke, l'équivalent du charbon de bois, avec lequel on fait la fonte, le fer et l'acier. Mais il n'y a pas de houille partout et son transport coûtait cher. Dans certaines régions boisées, on a donc continué à faire du charbon de bois. En Provence, ce sont surtout des Italiens originaires du Piémont, spécialisés dans le métier de charbonnier, qui sont venus exploiter les forêts de chênes et de chênes verts. Ils apparaissent parfois dans la littérature, par exemple dans le roman *Les Charbonniers de la mort* de Pierre Magnan. Pendant la dernière guerre, on manquait de charbon, et la fabrication du charbon de bois a repris à petite échelle : les

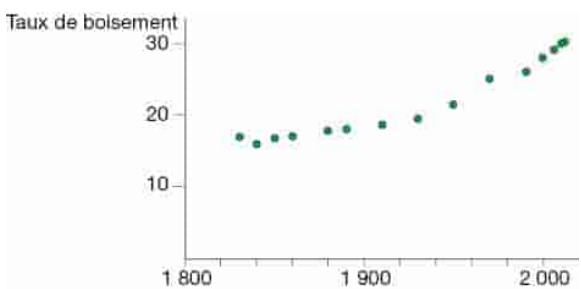
meules étaient remplacées par des cuves en tôle que l'on montait sur place.

Fourneau à charbon de bois démontable utilisé pendant l'occupation allemande.

Les multiples utilisations du charbon de bois ont contribué à faire disparaître de nombreuses forêts, en particulier dans la région méditerranéenne où elles étaient très vulnérables.

Quand le renouveau de la forêt a-t-il commencé ?

La régression de la forêt s'est arrêtée au XIXe siècle. La tendance s'est ensuite inversée et la surface forestière continue de progresser de nos jours.



Évolution récente du pourcentage de la surface forestière en France métropolitaine (Observatoire national de la biodiversité, 2016).

La surface forestière a doublé depuis le début du xixe siècle. On estime qu'elle a retrouvé le niveau qu'elle avait à la fin du Moyen Âge.

Ce changement radical est dû aux effets de la révolution industrielle et à la prise de conscience de l'importance des forêts.

Le bois a été progressivement remplacé par le charbon pour le chauffage et l'industrie, et par le métal dans la construction navale. Et l'État, tous régimes confondus, a pris les choses en main. L'École royale forestière (future École nationale des eaux et forêts) a été créée en 1824 à Nancy. Le Code forestier, instauré en 1827, a réglementé le défrichement des forêts et leur utilisation pour le pâturage. Des futaies de pins ont été plantées pour les besoins des mines et du chemin de fer. Les forêts des Landes et de Sologne datent du Second Empire. À la suite d'inondations catastrophiques, le Service de restauration des terrains de montagne a été créé, et de grandes surfaces ont été reboisées en montagne pour stabiliser les sols.

Un exemple de reboisement réussi au xixe siècle : le massif de l'Aigoual dans les Cévennes.

Après la Première Guerre mondiale, l'exode rural s'est accéléré, et des terres autrefois cultivées ont peu à peu été envahies par la forêt. Le phénomène a beaucoup touché les régions de montagne, où l'érosion due au surpâturage avait augmenté la fréquence et l'importance des avalanches et des crues. De nombreux hameaux ont été abandonnés, et la forêt s'est réinstallée progressivement. On est étonné de découvrir d'anciens murets de pierres et des ruines de bâtiments au milieu des arbres.

Anciens hameaux du Sellon et des Boyers (Hautes-Alpes).

Ces hameaux, qui comptaient respectivement 32 et 11 habitants en 1856, ont été abandonnés en 1916.

La progression de la forêt est bien visible quand on compare les cartes postales du début du XXe siècle aux paysages actuels. La progression relativement rapide des forêts n'est pas une surprise. Il existe des arbres adaptés à des milieux très variés, et leurs racines sont capables de s'ancrer un peu partout.

Les racines peuvent fixer les arbres sur des supports très variés.

Pin cembro dans les Hautes-Alpes et pin au bord d'un petit loch en Écosse.

D'après l'inventaire de l'Institut géographique national, la surface forestière de la France métropolitaine s'étendait en 2020 sur 17 Mha, soit 31 % du territoire. Elle se répartit en 67 % de forêts de feuillus, 21 % de forêts de conifères et 12 % de forêts mixtes. En Europe, c'est la Suède qui possède la plus grande surface boisée avec 27 Mha.

Viennent ensuite la Finlande (22 Mha), l'Espagne (18 Mha) et la France.

La gestion actuelle des forêts

En France, les forêts privées couvrent 75 % de la surface boisée. Les forêts publiques appartiennent à l'État (forêts domaniales, 9 %) et aux collectivités locales, essentiellement des communes (16 %).

Les forêts publiques

Les forêts domaniales sont découpées en parcelles numérotées dont les limites sont indiquées en vert sur fond blanc. Celles des forêts communales sont repérées par des lettres ou des chiffres, parfois accompagnés d'un blason.

Marquage de parcelles dans une forêt domaniale, et dans une forêt communale du Haut-Rhin.

Les forêts publiques sont souvent anciennes, et leur surface évolue peu. Leur gestion est confiée à l'Office national des forêts (ONF). Dans une forêt, toutes les essences d'arbres ne poussent pas à la même vitesse : elles n'ont pas toutes les mêmes exigences en termes de composition et d'humidité du sol, et de luminosité. Leur fructification est plus ou moins abondante et la germination plus ou moins facile. Dans les Alpes du Sud, quand une forêt part à l'assaut d'un versant de montagne, le mélèze joue un rôle pionnier, mais le sapin finit

généralement par supplanter les autres espèces. Si on laisse faire la nature, la compétition entre les arbres fait évoluer le peuplement forestier dans une direction qui n'est pas nécessairement la plus intéressante sur le plan de la production de bois ou de la richesse biologique. La gestion d'une forêt consiste donc à définir des objectifs précis et à favoriser ou, au contraire, « dissuader » certaines espèces, en pensant aux générations futures.

La forêt de la Sainte-Baume est une forêt domaniale de 2 076 hectares, distante d'une vingtaine de kilomètres à peine de la mer. Elle abrite des essences remarquables, et sa gestion a fait l'objet de nombreuses discussions. Certains voulaient laisser faire la nature, d'autres estimaient que les ifs et les houx progressaient trop vite au détriment des jeunes hêtres. Finalement, l'ONF s'efforce de conserver l'équilibre actuel entre les différentes espèces.

Un autre exemple : pour stabiliser les versants de montagne, on plante souvent des pins noirs d'Autriche qui s'enracinent fortement sur les sols meubles et qui résistent bien au froid et à la sécheresse. Dès que l'humus produit le permet, on cherche à diversifier le peuplement pour accroître la richesse écologique de la forêt. Les gestionnaires des forêts ont parfois des auxiliaires inattendus. Dans les Alpes, les casse-noix mouchetés font une grande provision de graines de pins cembro à la fin de l'été, et ils les dissimulent en prévision de l'hiver. Les graines oubliées germent et participent au reboisement des versants.

Le casse-noix moucheté et les pins cembro.

Dans nos sociétés urbanisées, les forêts ont un rôle écologique et

social très important. Pour faciliter l'accueil du public, les agents de l'ONF aménagent des aires de pique-nique, tracent des sentiers botaniques et installent des panneaux explicatifs. Pour certaines personnes, la forêt est un espace de détente. Pour d'autres, c'est un lieu d'observation de la nature ou de méditation.

« Quand je suis parmi vous, arbres de ces grands bois,

Dans tout ce qui m'entoure et me cache à la fois,

Dans votre sollicitude où je rentre en moi-même,

Je sens quelqu'un de grand qui m'écoute et qui m'aime. »

Victor Hugo, Les Contemplations

Invitation à la découverte.

C'est le domaine des bêtes furtives, entrevues un instant. Chaque bruit y acquiert de l'importance. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, le nombre d'espèces d'oiseaux qui y nichent n'est pas très grand. Le feuillage empêche souvent de les voir, mais les ornithologues les reconnaissent à leurs chants. L'oiseau emblématique des grandes forêts est le pic noir, dont le tambourinage et les cris sonores portent loin.

Le pic noir se nourrit d'insectes xylophages.

Depuis 2007, l'ONF décerne le label « Forêt d'exception » à des forêts qui se distinguent par l'excellence de leur gestion et leurs qualités patrimoniales. Quatorze forêts sont actuellement labellisées : Fontainebleau, Verdun, Grande Chartreuse, Rouen, Montagne de Reims, Bercé, Bassin d'Arcachon, Val Suzon, Tronçais, Sainte-Baume, Boscodon, Aigoual, Volcans de la Martinique, forêt indivise de Haguenau.

Les forêts privées

Dans notre pays, ce sont surtout les forêts privées qui progressent sous l'effet de la déprise agricole, en particulier dans le Sud-Est (Languedoc-Roussillon, Corse, Alpes du Sud) et le Nord-Ouest (Bretagne et Pays de Loire). Ces forêts sont extrêmement morcelées : il y a 3,2 millions de propriétaires de forêts en France ! Ceux qui privilégient la rentabilité immédiate plantent des résineux à croissance rapide comme les douglas. Ces plantations monotones, au sol quasi stérile, peuvent difficilement être qualifiées de forêts. Lorsque les arbres ont une quarantaine d'années, d'énormes engins équipés de bras articulés les coupent et les ébranchent. Les grumes sont transportées vers des scieries où elles sont transformées en palettes. On cultive le bois comme on cultive le blé, y compris en utilisant des désherbants. D'autres propriétaires considèrent qu'une forêt est avant tout un lieu de vie, et ils usent de méthodes plus respectueuses de la biodiversité.

L'exploitation industrielle de la forêt : une coupe rase et son résultat.

On évoque régulièrement dans les médias les problèmes liés à l'exploitation du bois en France, que l'on peut résumer schématiquement de la façon suivante :

• Dans notre pays, seulement 50 % de l'accroissement du bois produit dans les forêts est coupé chaque année. Le nombre d'arbres âgés, plus fragiles et plus exposés aux maladies, augmente. La forêt française vieillit et devient plus vulnérable aux tempêtes et aux incendies.

• La France exporte beaucoup de bois brut (grumes), et importe du bois issu de forêts tropicales qui sont rarement gérées de façon durable.

• La France importe massivement les produits à forte valeur ajoutée issus de la transformation du bois : panneaux et contreplaqués, meubles, papier, carton.

Le manque de compétitivité des industries de transformation du bois se traduit par un déficit commercial chronique.

Les feux de forêts

Contrairement à ce qu'on pourrait penser, seuls 25 % des départs de feu sont volontaires : 2 % sont dus à la foudre, 43 % à des imprudences et 30 % sont d'origine inconnue. La part des imprudences étant prépondérante, on peut espérer progresser. Elles sont d'origines très variées : travaux agricoles ou industriels, pique-

niques, feux de camp, barbecues, jets de mégot. Par temps de forte sécheresse et de mistral, il faut peu de chose pour faire démarrer le feu en région méditerranéenne. Les départs de feux sont actuellement détectés et traités très tôt avec des moyens techniques importants, ce qui limite l'étendue des surfaces brûlées. Pour stopper les départs de feux, on utilise souvent des hélicoptères bombardiers d'eau. Ils sont maniables et interviennent de façon précise. Des petits avions, les trackers, effectuent des vols de reconnaissance et limitent la progression du feu en larguant un « agent retardant » qui élève la température d'inflammation des végétaux. Il contient un colorant à base d'oxyde de fer qui permet de repérer les zones traitées.

Quand les incendies deviennent trop importants, il faut faire appel aux Canadair. Leurs pilotes sont confrontés à de grandes difficultés. Ils sortent souvent par fort mistral, et doivent voler le plus bas possible au-dessus de reliefs accidentés, parfois traversés par des lignes électriques à haute tension. Au remplissage des soutes, l'avion prélève environ 6 000 litres d'eau. Au largage, son poids passe de 19 tonnes à 13 tonnes, le poids à vide de l'avion. Le pilote doit « encaisser » cette variation rapide du poids de l'appareil. L'eau est vaporisée au contact du brasier, et l'énorme quantité de vapeur produite chasse l'air. Le feu est « étouffé ». L'absorption de chaleur qui accompagne la vaporisation provoque un refroidissement qui empêche le feu de repartir immédiatement.

Photo Éric Barthélemy

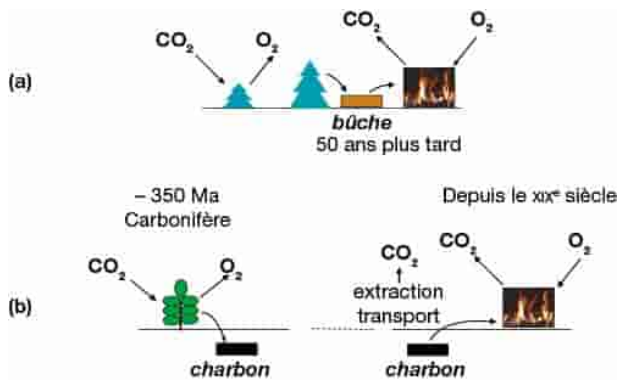
Avion Canadair en opération.

Du point de vue écologique, un feu de forêt n'est pas nécessairement une catastrophe : la végétation peut souvent repartir. Mais le passage répété des incendies au même endroit empêche la reconstitution des écosystèmes. Les sols s'appauvrissent et deviennent plus sensibles à l'érosion, et ils sont emportés par les pluies d'orage, fréquentes en région méditerranéenne.

Le bilan carbone des forêts

Le jour, les arbres absorbent le dioxyde de carbone de l'air et produisent du glucose et du dioxygène. La nuit, ils consomment une partie du glucose synthétisé le jour, ce qui génère du CO_2. Quel est le bilan de ces échanges ?

Pendant sa croissance, un arbre consomme plus de CO_2 qu'il n'en produit : il fixe du carbone dans la matière organique du bois et produit du dioxygène. Le carbone est stocké dans l'arbre à maturité, et il le reste si le bois sert à faire des charpentes ou des meubles. Sinon, à la mort de l'arbre, sa matière organique est décomposée par des êtres vivants qui pratiquent la respiration (insectes, champignons, micro-organismes) : ils absorbent du dioxygène et produisent du CO_2, et le bilan carbone est nul. C'est bien sûr aussi le cas si le bois est brûlé (figure a ci-dessous). Dans une forêt, les jeunes arbres absorbent beaucoup le CO_2, les plus âgés le stockent et la décomposition du bois mort émet du CO_2. Le bilan carbone d'une forêt dépend donc beaucoup de la distribution de l'âge des arbres.



Bilan carbone de la combustion du bois et d'un combustible fossile.

Combustibles fossiles et renouvelables

Quand on brûle le bois d'un arbre, on remet son bilan carbone à zéro. Mais si cet arbre fait partie d'une forêt gérée « durablement », la production de CO_2 due à la combustion est compensée par l'absorption du CO_2 par les jeunes arbres qui remplacent les anciens : le bois fournit une énergie *renouvelable*. Ce n'est pas le cas lorsqu'on brûle du charbon. Les charbons se sont formés au Carbonifère, il y a environ 300 millions d'années. À cette époque, les continents étaient couverts de forêts et de végétaux divers dont une partie était périodiquement enfouie dans les sédiments des marécages, échappant ainsi à la décomposition. Sous l'effet de la pression, la matière organique s'est progressivement transformée en charbons qui ont séquestré le

carbone. Quand on les brûle aujourd'hui, on remet leur bilan carbone à zéro sans aucune compensation (voir figure b page précédente) : l'énergie fournie par le charbon n'est pas renouvelable, pas plus que celle des autres combustibles fossiles comme le pétrole et le gaz naturel. L'extraction et le transport des combustibles fossiles dégradent encore leur bilan carbone. Dans le cas du pétrole, il faut aussi ajouter le raffinage.

La photosynthèse est le mécanisme de séquestration du carbone le plus important sur Terre. Les océans et les continents absorbent chaque année la moitié du CO_2 émis par les activités humaines. La part des océans est prépondérante (environ les deux tiers) grâce au phytoplancton et à la dissolution du CO_2 dans l'eau. Les continents absorbent le tiers restant. Ils piègent le CO_2 dans la végétation et dans les sols, en particulier dans les zones humides et les tourbières.

Appendice

Multiples et sous-multiples des puissances de dix

Rappelons que le nombre 10^n représente 1 suivi de *n* zéros et que $10^{-n} = 1/10^n$.

Les unités de base du système international

La température exprimée en degrés Celsius est liée à la température thermodynamique par la relation :

$$T(°C) = T(K) - 273{,}15$$

Les unités dérivées

Les unités des autres grandeurs sont définies à partir des unités de base. Certaines ont reçu un nom :

- la *force* : un newton (N) = 1 kg.m/s^2 ou 1 kg.m.s^{-2}
- la *pression* : un pascal (Pa) = 1 kg.m^{-1}.s^{-2}
- la *fréquence* : un hertz (Hz) = 1 s^{-1}
- la *différence de potentiel* (ou tension) électrique : un volt (V) = 1 W/A = 1 kg.m^2.s^{-3}.A^{-1}
- l'*énergie* : un joule (J) = 1 N.m = 1 kg.m^2.s^{-2}
- la *puissance* : un watt (W) = 1 J/s = 1 kg.m^2.s^{-3}

Les *symboles* des noms d'unités donnés en l'honneur d'un grand scientifique commencent par une *majuscule* :

Ampère, Kelvin, Newton, Pascal, Hertz, Volta, Joule, Watt, Tesla, etc.

Les noms d'unités *écrits en toutes lettres* sont des *noms communs* : ils ne commencent pas par une majuscule et prennent un *s* au pluriel. On écrit par exemple : « La toise valait environ 1,95 mètre et la lieue

environ 4 kilomètres. » Par contre, les *symboles* des noms d'unités sont *invariables* : « La puissance de cet appareil est égale à 2 000 watts ou 2 000 W. »

Bibliographie

Cadrans solaires traditionnels en Queyras-Briançonnais. Gaëlle Ducrot et Pierre Putelat. Éditions du Queyras (2003).

Enfants du Soleil. Histoire de nos origines. André Brahic. Odile Jacob (2000).

Les Découvreurs. Daniel Boorstin. Robert Laffont (2004).

Méharées. Théodore Monod. J'ai Lu (2012).

Du temps et de l'eau. Requiem pour un glacier. Andri Snaer Magnason. Alisio (2021).

Une histoire des marées. André Gillet. Belin (1998).

Les Monuments de l'eau en Provence. Jean-Marie Homet. Edisud (2007).

Combien pèse un nuage ? Jean-Pierre Chalon. EDP Sciences (2014).

La Foudre. Nature, histoire, risques et protection. Claude Gary. Dunod (2004).

La Météo de montagne. Jean-Jacques Thillet. Seuil (2004).

Les Grandes Expériences scientifiques à Paris. Frédéric Borel. Parigramme (2013).

La Couleur dans tous ses éclats. Bernard Valeur. Belin (2011).

La Grande Encyclopédie des minéraux. Rudolf Duda et Lubos Reji. Gründ (1986). On peut se procurer d'occasion ce livre très complet et très bien illustré. Mais aucun livre ne peut remplacer la visite des collections de minéraux. À Paris, celles de l'École des mines Paris Tech, 60 bd Saint-Michel, et de Sorbonne Université à Jussieu.

Terres d'ailleurs. À la recherche de la vie dans l'Univers. André Brahic et Bradford Smith. Odile Jacob (2015).

Jamais seul. Ces microbes qui construisent les plantes, les animaux et les civilisations. Marc-André Selosse. Babel (2021).

250 réponses aux questions des amoureux de la forêt. Jean-Marie Ballu. Éditions du Gerfaut (2006).

Romans cités dans le texte

Les Cheveux de Bérénice. Denis Guedj. Points (2003).

La Méridienne. Denis Guedj. Points (2008).

Le Méridien de Greenwich. Jean Échenoz. Éditions de Minuit (1979).

L'Île du jour d'avant. Umberto Eco. Le Livre de poche.

L'Homme invisible. H.G. Wells. Le Livre de poche.

Les Charbonniers de la mort. Pierre Magnan. Folio.

Copyright

© De Boeck Supérieur s.a. – Septembre 2022

Rue du Bosquet, 7 – B-1348 Louvain-la-Neuve

ISBN : 978-2-807-34143-2

Site internet : www.deboecksuperieur.com

Cette œuvre est protégée par le droit d'auteur et strictement réservée à l'usage privé du client. Toute reproduction ou diffusion au profit de tiers, à titre gratuit ou onéreux, de tout ou partie de cette œuvre, est strictement interdite et constitue une contrefaçon prévue par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la Propriété intellectuelle. L'éditeur se réserve le droit de poursuivre toute atteinte à ses droits de propriété intellectuelle devant les juridictions civiles ou pénales…

Mise en page : SCM, Toulouse

Partez à la découverte des phénomènes de la nature en 100 questions essentielles !

Peut-on expliquer ce qu'indique un cadran solaire, la formation des stalactites de glace, la nature des nuages et de la foudre, la couleur bleue des océans, l'apparition d'un arc en ciel, l'ascension de la sève dans les arbres, l'effet de serre de l'atmosphère, mais aussi l'origine du système solaire et de la vie ?
Ce livre vous propose des réponses à l'aide d'explications simples, de schémas en couleurs, de photos, d'exemples pris dans la vie de tous les jours et de quelques formules indispensables. Des encadrés culturels viennent compléter l'ensemble.

En ligne : de nombreux compléments également accessibles par flashcodes

Patrick Bertrand est physicien. Conférencier passionné par la vulgarisation, il anime depuis plusieurs années des ateliers à l'Université du temps libre de Gap et durant les fêtes de la science autour des thématiques biotechnologiques, astronomiques et environnementales.

deboeck SUPÉRIEUR

www.deboecksuperieur.com

Conception graphique : Primo&Primo